



**Universidade de Brasília - UnB**  
**Faculdade UnB Gama - FGA**  
**Engenharia de Energia**

**CARACTERIZAÇÃO COMPRESSIVA DE ELASTÔMEROS:  
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E MODELAGEM MATEMÁTICA**

**Autores: Ludmila Evangelista dos Santos**  
**Orientadora: Dra. Suélia de Siqueira Rodrigues Fleury Rosa**  
**Coorientador: MSc. Danilo dos Santos Oliveira**

**Brasília, DF**  
**2017**



**LUDMILA EVANGELISTA DOS SANTOS**

**CARACTERIZAÇÃO COMPRESSIVA DE ELASTÔMEROS: AVALIAÇÃO  
EXPERIMENTAL E MODELAGEM MATEMÁTICA**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientadora: Dra. Suélia de Siqueira Rodrigues Fleury Rosa

Coorientador: MSc. Danilo dos Santos Oliveira

**Brasília, DF**

**2017**

**CIP – Catalogação Internacional da Publicação \***

SANTOS,Ludmila Evangelista dos.

CARACTERIZAÇÃO COMPRESSIVA DE ELASTÔMEROS:  
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E MODELAGEM MATEMÁTICA/  
Ludmila Evangelista dos Santos. Brasília: UnB, 2017. 64 p. : il. ; 29,5  
cm.

Monografia (Graduação) - Universidade de Brasília Faculdade do  
Gama, Brasília, 2017. Orientação: Suélia de Siqueira Rodrigues Fleury  
Rosa.

1. Elastômero. 2. Látex. 3. *Bond Graph*. I. ROSA, Suélia de Si-  
queira Rodrigues Fleury. II. CARACTERIZAÇÃO COMPRESSIVA  
DE ELASTÔMEROS: AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E MODELA-  
GEM MATEMÁTICA.

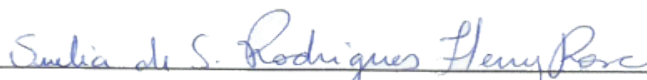
CDU Classificação XXX



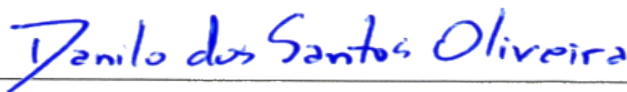
## **CARACTERIZAÇÃO COMPRESSIVA DE ELASTÔMEROS: AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E MODELAGEM MATEMÁTICA**

**Ludmila Evangelista dos Santos**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 20/06/2017 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:



**Dra. Suélia de Siqueira Rodrigues Fleury Rosa, UnB/FGA**  
Orientador



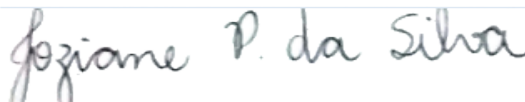
**MSc. Danilo dos Santos Oliveira, UnB/FGA**  
Co-Coorientador



**MSc. Marina Pinheiro Marques, UnB/FGA, UnB/FGA**  
Membro Convidado



**Gilvandson Costa Cavalcante, UnB/FGA, UnB/FGA**  
Membro Convidado



**Joziane Porcino da Silva, UnB/FGA, UnB/FGA**  
Membro Convidado

Brasília, DF

2017

## AGRADECIMENTOS

Á Deus, por me conceder saúde e me dado força para não desistir.

A minha família, meus pais Maria da Piedade Barbosa dos Santos e Dorival Evangelista dos Santos, minha irmã Renata e família pela ajuda, apoio e cuidado.

A professora Orientadora Dra. Suélia de Siqueira Rodrigues Fleury Rosa e Coorientador MSc. Danilo dos Santos Oliveira, pela orientação, ajuda e dedicação para escrever esse trabalho.

MSc. José Henrique que ajudou com informações e cedendo materiais para a produção das amostras. Aos professores da UNB Gama, em especial ao Dr. Luciano Gonçalves Noletto por disponibilizar material didático e tirar dúvidas, Dr. Rhander Viana por tirar dúvidas e auxílio na produção do texto e Maria Del Pilar Hidalgo Falla que incentivou e ajudou na produção desse trabalho.

Aos Funcionários servidores e terceirizados que cuidam da segurança, limpeza, administrativo e demais serviços necessários para o bom funcionamento da instituição.

A todos os amigos que me ajudaram e aconselharam no decorrer da minha graduação, seria injusto citar nomes, pois todos que passaram pela minha vida deixaram aprendizado e contribuições.

Ao Laboratório de Processo de Fabricação (LabPro) da Faculdade UnB Gama (FGA) da Universidade de Brasília (UnB), Laboratório de Materiais, Laboratório de Materias da FGA, Laboratório de Engenharia e Inovação (LEI) e Laboratório de Engenharia Biomédica (LAB).

Sem Jesus, família, amigos, o corpo de funcionários e servidores, docentes, administrativo e terceirizado, seria impossível permanecer na caminhada.

Obrigada a todos!

A glória desta última casa será maior do que a da primeira, diz o Senhor dos Exércitos, e neste lugar darei paz, diz o Senhor dos Exércitos (Ageu 2.9).  
Bíblia Sagrada.

## RESUMO

A utilização dos elastômeros sintéticos e naturais em detrimento aos materiais ditos como tradicionais como metal, cerâmica, vidro e madeira, podem conferir aperfeiçoamento para a confecção de equipamentos industriais e biomédicos. O uso e desenvolvimento para utilização dos elastômeros sintéticos e naturais possuem algumas dificuldades, pois há poucas informações quanto a caracterização de suas propriedades mecânicas. O objetivo geral deste trabalho é realizar a caracterização deste tipo de material via testes mecânicos de natureza compressiva por avaliação experimental e modelagem matemática. Foi proposto como método para caracterização dos elastômeros a utilização das normas técnicas ASTM D395, D2240 e D575, que definem critérios para teste de deformação permanente a compressão, teste dureza e teste dinâmico de compressão, respectivamente, e ainda foi feita a modelagem matemática para o sistema sendo empregado o método *Bond Graph* que relaciona as trocas de energia do sistema. Resultados apresentados caracterizaram a dureza, a deformação permanente e a resposta dinâmica a compressão da borracha de silicone e do látex em análise. Conclui-se que os valores obtidos pela modelagem matemática são similares para os valores encontrados nos testes experimentais, evidenciando a aplicabilidade do método proposto.

**Palavras-chave:** Elastômero. Látex. *Bond Graph*. Compressão. .

## ABSTRACT

The use of synthetic elastomers and natural things in detriment to materials such as the traditional metal, ceramics, glass and wood, can to give improvement to make equipment industrial and biomedical. the use and development for the use of elastomers synthetics and natural things descriptions of difficulties as there is little information as for a characterization of its mechanical properties. The general objective of this work is to perform a of this type of material via mechanical testicles compressive nature by experimental evaluation and mathematical modeling. It was proposed as a method for characterization of elastomers for use from the technical standards ASTM D395, D2240 and D575, which we define for the definition criteria of the countries in conflict. for permanent testing and compression, test hardness and dynamic test of compression, respectively, and the mathematical modeling for the system and method employed, the Bond Graph that relates how system energy exchanges. Results found characterized the hardness, a modern configuration and a dynamic response to the silicone rubber and latex under analysis. We conclude that the values obtained by the mathematical modeling are similar for the values found in the experimental tests, evidence of an applicability of the proposed method.

**Key-words:** Elastomer. Latex. Bond Graph. Compression.



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVAÇÃO	1
1.2	HIPÓTESE	3
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO	3
1.4	ESTADO DA ARTE	4
1.5	APRESENTAÇÃO DO DOCUMENTO	4
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>6</b>
2.1	ELASTÔMEROS	6
2.1.1	Dureza	7
2.1.2	Resiliência	8
2.1.3	Resposta elastoplástica à compressão	8
2.2	<i>HEVEA BRASILIENSIS</i>	9
2.2.1	Propriedades do Látex	9
2.2.2	Vulcanização do Látex	10
2.3	MODELAGEM MATEMÁTICA POR GRÁFICOS DE LIGAÇÃO	10
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>14</b>
3.1	NORMAS TÉCNICAS	14
3.2	MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	14
3.3	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	15
3.3.1	Manufatura dos Acessórios	15
3.3.2	Molgadem dos elastômeros sintéticos	16
3.3.3	Moldagem dos elastômeros naturais	18
3.4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	19
3.4.1	Metodologia do teste de dureza	19
3.4.2	Metodologia do teste de deformação permanente à compressão	20
3.4.3	Metodologia do teste dinâmico de compressão	21
3.5	MÉTODO DE MODELAGEM VIA <i>BOND GRAPH</i>	22
3.5.1	Análise de estabilidade	26
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES</b>	<b>28</b>
4.1	TESTE DE DUREZA	28
4.1.1	Dureza silicone	28
4.1.2	Dureza látex	30
4.2	TESTE DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE À COMPRESSÃO	31
4.3	TESTE DE DINÂMICO DE COMPRESSÃO	33
4.4	MODELAGEM <i>BOND GRAPH</i>	36
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>42</b>

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>44</b>
<b>APÊNDICE A DISPOSITIVO DE COMPRESSÃO DINÂMICA</b>	<b>48</b>
<b>APÊNDICE B DISPOSITIVOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE</b>	<b>49</b>
B.1 ESPAÇADOR CILÍNDRICO	50
B.2 ESPAÇADOR PRISMÁTICO A	51
B.3 ESPAÇADOR PRISMÁTICO B	52
B.4 PLACA DE COMPRESSÃO	53
<b>APÊNDICE C DISPOSITIVOS DE MOLDAGEM</b>	<b>54</b>
C.1 MOLDE EM POLIÓXIDO DE METILENO	55
C.2 MOLDE EM ALUMÍNIO	56
<b>APÊNDICE D CÓDIGO MATLAB</b>	<b>57</b>
D.1 MODELAGEM MATEMÁTICA PARA ELASTÔMEROS SINTÉTICOS	57
D.2 MODELAGEM MATEMÁTICA PARA ELASTÔMEROS NATURAIS	61

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Curva Tensão-Deformação . . . . .	9
Figura 2 – Representação em <i>Bond Graph</i> para o sistema análogo do elastômero. . . .	12
Figura 3 – Moldagem dos elastômeros . . . . .	17
Figura 4 – Processo de produção da forma para modelagem do elastômero natural e produção das amostras . . . . .	19
Figura 5 – Metodologia de vulcanização das amostras em látex. . . . .	20
Figura 6 – Teste de deformação permanente à compressão . . . . .	21
Figura 7 – Teste dinâmico de compressão . . . . .	23
Figura 8 – Correlação entre o modelo físico e o modelo análogo mecânico. . . . .	24
Figura 9 – Ensaio de dureza Shore-A dos elastômeros sintéticos. . . . .	29
Figura 10 – Ensaio de dureza Shore-A dos elastômeros naturais vulcanizados sem adição de água. . . . .	30
Figura 11 – Porcentagem de Deformação das amostras . . . . .	32
Figura 12 – Ensaio de deformação permanente a compressão dos elastômeros naturais. .	32
Figura 13 – Resposta a dinâmica a compressão dos elastômeros sintéticos . . . . .	33
Figura 14 – Resposta a compressão - Látex . . . . .	34
Figura 15 – Análise de estabilidade para os elastômeros sintéticos . . . . .	37
Figura 16 – Análise de estabilidade para os elastômeros naturais . . . . .	38
Figura 17 – Deformação dinâmica a compressão . . . . .	39
Figura 18 – Deformação numérica vs deformação experimental . . . . .	40
Figura 19 – Deformação dinâmica a compressão dos elastômeros naturais . . . . .	40
Figura 20 – Deformação dinâmica numérica vs deformação experimental dos elastômeros naturais . . . . .	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos elastômeros quanto à dureza Shore-A do material. . . . .	8
Tabela 2 – Variáveis que compõem o modelo análogo e sua representação em BG . . .	24
Tabela 3 – Valores dimensionais e de massas do elastômeros sintéticos. . . . .	28
Tabela 4 – Valores dimensionais e de massas do elastômeros naturais. . . . .	28
Tabela 5 – Valores simulados em MatLab dos pólos para cada elastômero em análise. .	36

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

O estudo para desenvolver materiais para aplicações de engenharia são constantes, principalmente ao que se concerne ao aumento da eficiência de determinado processo ou equipamento (SANTEULARIA et al., 2016).

Materiais como madeira, vidro, cerâmicas e metais são utilizados pela humanidade há séculos para confecção de produtos de forma artesanal, porém houve mudanças devido a revolução industrial, pois o objetivo passou a ser processos de manufatura em grande escala e padronizado, o que acabou por exigir maior eficiência e desempenho dos equipamentos e dispositivos e por sua vez, melhorias dos materiais já conhecidos. A revolução industrial tornou os processos de manufatura, mais severos, o que forçou melhorias tecnológicas e estudos na área de materiais para assim suportar as condições críticas de trabalho como o aumento de carga, pressão, temperatura e outros fatores (MANO; MENDES, 1999).

A descoberta de novos materiais tem, portanto, impacto no aperfeiçoamento dos equipamentos e máquinas utilizados nos processos de manufatura e podem contribuir em aplicações biomédicas, atuando na substituição ou refino dos materiais tradicionais, trazendo benefícios para a diminuição dos custos de projeto e de manufatura dos equipamentos e dispositivos, favorecendo o desenvolvimento e a inserção de inovações tecnológicas (PALMA et al., 2016).

Dentro desse contexto e devido o aprimoramento de estudos na área da química foi possível identificar novos materiais que poderiam substituir ou polir a utilização dos ditos materiais clássicos (MANO; MENDES, 1999). Dentre eles, destacam-se os elastômeros sintéticos e naturais.

Os elastômeros sintéticos se destacaram no final da década de 20. São gerados pela síntese polimérica das moléculas gasosas insaturadas, gerada pelo processo de *cracking*, pirólise a temperatura média de 800°C e catálise, da fração de nafta do petróleo, no processo de beneficiamento do petróleo cru. Portanto, são constituídos por macromoléculas e possuem propriedades físicas semelhante as que são encontradas nos elastômeros naturais, tendo aplicações na engenharia de materiais como, por exemplo, na manufatura de utensílios para armazenagem de alimentos, próteses, dentre outras aplicações, porém seu uso não é recomendado em aplicações na área da biomédica que tenha contato direto com os fluidos biológicos do ser vivo, pois em geral é um material não biocompatível (SILVA; FONSECA; ANDRADE, 2014).

Os elastômeros sintéticos são produzidos principalmente por moléculas insaturadas como o etileno, propileno e butadieno, porém a outras configurações químicas que podem ser geradas para produção de polímeros. As informações fornecidas pelos fabricantes desse tipo de

material, são em geral, a descrição do produto em seu estado físico e químico antes do processo de vulcanização, como aspecto, cor, viscosidade, densidade. Após o processo de vulcanização as informações são relacionadas a dados referentes a dureza, alongamento, resistência a ruptura, resistência a rasgo e retração da borracha. Ainda assim, há falta de dados que conectem essas grandezas, fazendo-se necessário conhecer a taxa de deformação, a compressibilidade e a conexão que essas grandezas possuem, complementando o dado de dureza (PEYDRÓ-RASERO et al., 2012).

A borracha natural é geralmente produzida pelo látex de uma árvore denominada popularmente por seringueira (*Hevea Brasiliensis*) nativa do Brasil, espécie economicamente viável. É conhecido o beneficiamento do látex como matéria prima para produção de pneus, pois é um material que possui boa resistência mecânica para suportar o peso do carro, deformando-se e retornando rapidamente a sua espessura inicial no tempo em que a roda do automóvel leva para dar uma volta completa.

O processo de beneficiamento do látex para sua utilização é necessário, pois em seu estado natural possui pouca resistência mecânica e é viscoso. O elastômero natural pode ser encontrado em estado líquido, em que é adicionado anticoagulante em seu processo de sangria, sendo pré-vulcanizado e centrifugado para que seja utilizado. Pode ser beneficiado em barras coaguladas denominadas de Granulado Escuro Brasileiro (GEB). As informações dos elastômeros naturais são ausentes, por parte do fabricante, devido a várias finalidades que podem ser empregados, por se tratar de um material de aspectos únicos, há um amplo ambiente para desenvolvimento de novos métodos de fabricação e aplicações industriais e biomédicas (COSSA; SIRQUEIRA; SOARES, 2009).

Percebeu-se que os elastômeros sintéticos e naturais tinham potencial para aplicações na área industrial e para finalidades biomédicas, devido as suas características. Destacando-se o comportamento em que sofre deformação e retorna após cessada a aplicação do esforço, sua forma inicial, sem ter variação significativa em sua espessura (SILVA; FONSECA; ANDRADE, 2014). Portanto, o conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais para determinar o seu comportamento quando sofre uma tensão ou compressão e a relação que essas grandezas possuem entre si é vital para caracterizar o sistema em análise.

Logo, o estudo para caracterização da compressibilidade é realizado para determinar as características mecânicas que o elastômeros sintéticos e naturais possuem. Esses dados são relevantes para determinar a dureza do material, obter a resposta dos elastômeros, quando submetidos a carregamento constante e dinâmico.

A norma *American Society for Testing and Materials* - ASTM está sendo utilizada neste trabalho devido não haver normas brasileiras em vigor para caracterização mecânica de materiais como a borracha, sendo prejudicial para indústria de materiais, pois a não tradução pode trazer dificuldades e gerar dúvidas a respeito de informações essenciais para a realização dos testes.

Além das validações experimentais do comportamento mecânico dos elastômeros para o aperfeiçoamento de equipamento e dispositivos de manufatura para aplicações na área de biomédica, é preciso atentar para a modelagem matemática. Esta por sua vez é utilizada no presente estudo para se ter confiabilidade na aplicação de situações reais, o que possibilita a previsibilidade do comportamento e a eficiência que tal material pode oferecer no contexto dos equipamentos industriais e biomédicos (COSTA, 2015).

Portanto, o aprofundamento dos estudos nas áreas do conhecimento do comportamento mecânico dos elastômeros possibilita otimizar os custos com materiais, e validar modelos matemáticos, sem que haja a necessidade de construção do modelo físico experimental (MANO, 2007).

## 1.2 HIPÓTESE

A trabalho tem como hipótese a possibilidade de caracterizar experimentalmente algumas propriedades mecânicas dos elastômeros sintético e natural via testes experimentais de natureza compressiva e também a possibilidade de realizar uma modelagem matemática que seja coerente com os resultados experimentais.

## 1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral deste trabalho é realizar a caracterização dos elastômeros sintéticos e naturais via testes mecânicos de natureza compressiva por avaliação experimental e modelagem matemática. Para tanto pretende-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- Projetar e manufaturar dispositivos que auxiliem os ensaios compressivos;
- Projetar e manufaturar dispositivos que auxiliem no processo de moldagem e vulcanização das amostras objetos de pesquisa;
- Produzir protocolos do procedimento do método de moldagem dos elastômeros sintéticos e naturais;
- Realizar o teste de dureza Shore-A seguindo a norma - ASTM D2240;
- Realizar o teste deformação permanente à compressão - ASTM D395 (Método B);
- Realizar o teste dinâmico de compressão - ASTM D575;
- Modelar matematicamente o ensaio compressivo via técnica *Bond Graph* e comparar com os testes experimentais.

## 1.4 ESTADO DA ARTE

Os elastômeros sintéticos podem ter diversas aplicações, dentre as quais, pode-se destacar o estudo desenvolvido por (OLIVEIRA, 2017). O autor testifica a utilização de três tipos diferentes de elastômeros sintéticos e com variações de diâmetro para amortecer o movimento de pessoas que dependem de muletas para sua locomoção. Assim, faz-se a modelagem matemática do impacto da marcha para obter a força resultante do movimento. A muleta que foi estudada para a modelagem matemática e experimental foi a do tipo *muleta canadense*. O trabalho teve por objetivo avaliar qual conjunto de elastômeros testados possui melhor absorção da força quando carga é aplicada sobre as muletas.

Para as aplicações com uso dos elastômeros naturais que utilizam o látex produzido, principalmente, pela seringueira (*Hevea Brasiliensis*). Há várias pesquisas em aplicações na área biomédica, pois é um material biocompatível, tornando-se um material promissor em aplicações da área.

Estudos realizados por (XIMENES; PERON, 2013) apresentam uma palmilha plantar personalizada, que obtêm informações através de aquisição de dados por software específicos, para identificar possíveis variações quanto a marcha de crianças que possuem autismo em relação à marcha das crianças que não possuem esse tipo de distúrbio. São portanto, confeccionadas de alginato, gesso e látex, tendo como objetivo a identificação de algum tipo de patologia que podem se relacionar a marcha dessas crianças.

A autora (ROSA, 2009) desenvolveu um sistema de controle de fluxo esofágico para o tratamento da obesidade, é uma nova técnica com a utilização de um dispositivo fabricado com látex, inserido na parte inicial do esôfago, tendo como um dos objetivos a limitação da velocidade de ingestão de alimentos sólidos ingeridos por pacientes que sofrem com a obesidade atuando como auxiliador na perda de peso.

A autora (RIBEIRO; ROSA, 2016) descreve a utilização de uma membrana de látex para correção do estrabismo em crianças. Desenvolvendo uma técnica para a produção da membrana denominada de *Van Gogh*, possibilita substituir ou aperfeiçoar as técnicas que são usualmente praticadas para o tratamento do estrabismo em crianças.

O autor (COSTA, 2015) utiliza o látex na fabricação de um cateter com intuito de auxiliar no diagnóstico de câncer do esôfago, sendo uma solução acessível devido ao custo do material ser considerado baixo, comparado com as técnicas que são utilizadas atualmente para o diagnóstico deste tipo de câncer. Foi proposto a implementação do cateter no Sistema Único de Saúde(SUS).

## 1.5 APRESENTAÇÃO DO DOCUMENTO

O trabalho se dividirá em quatro capítulos.



No capítulo Um é apresentado a motivação para o trabalho, o objetivo geral e específicos. No capítulo Dois será abordado o conceito de elastômero sintético e natural, suas aplicações e como ocorre o processo de vulcanização para cada caso.

No capítulo Três são abordadas as normas técnicas utilizadas, a descrição dos equipamentos, usado para confecção das amostras e dispositivos que foram utilizados para a metodologia de fabricação das amostras, a descrição dos testes que foram utilizados para caracterização compressiva das amostras vulcanizadas dos elastômeros sintético e natural e ainda abordada a modelagem matemática que representa o comportamento dos elastômeros.

No capítulo Quatro são apresentados os resultados dos testes de dureza, deformação permanente à compressão e teste dinâmico de compressão, usados para se obter a caracterização dos elastômeros sintéticos e naturais. No capítulo Cinco são feitas as conclusões do trabalho e sugestões para sua continuação.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 ELASTÔMEROS

Os elastômeros são definidos como um tipo de polímero, pode ser de origem natural ou sintético e possui propriedades elásticas, formadas por ligações cruzadas. As ligações cruzadas são provenientes de ligações covalentes, que se mantêm unidas por força primária entre duas cadeias poliméricas, o que gera uma rede tridimensional (CANEVAROLO, 2006).

Os elastômeros são qualificados como materiais viscoelásticos, ou seja, quando submetidos a uma tensão de cisalhamento a viscosidade do fluido tende a retardar a taxa de deformação do elastômero, sendo a taxa de deformação diretamente proporcional a tensão que é aplicada ao material (WANG et al., 2012; PUSZKA; KULTYS, 2017).

A maioria dos materiais sólidos possuem alguma característica elástica, isto é, suporta determinado valor de carga sem que haja uma deformação permanente no material, porém essa região elástica é pequena em comparação a região elástica da borracha, pois a borracha é um material sólido que possui característica de fluido (LIMA et al., 2015).

Geralmente ao se aplicar uma tensão cisalhante ou extensiva nos elastômeros, ocorre uma deformação instantânea, seguida de uma deformação contínua. Após a suspensão do esforço sobre o elastômero, ocorrerá uma recuperação parcial instantânea, uma deformação reversível que depende sobre tudo do tempo de aplicação da força sobre o material, ainda pode haver uma deformação irreversível, caracterizada pelo não retorno total de sua espessura inicial, pois o material atinge a região plástica (CAL et al., 2012; ROGULSKA; KULTYS; PIKUS, 2017).

A propriedade viscoelástica é uma deformação reversível, e dependente do tempo de aplicação da força. É característico dos materiais possuinte de elevado peso molecular, como é o caso dos elastômeros sintéticos e naturais (PALMA et al., 2016).

Os elastômeros podem ser utilizados em aplicações industriais, como em automóveis, construção civil, tecidos de revestimento, encapsulamento elétrico, engenharia de componentes, mineração, utensílios utilizados para armazenar grãos, vedações e gaxetas, calçados, rodas e pneus dentre outras aplicações para engenharia de materiais, além da utilização na área industrial, pode ser utilizado em algumas aplicações médicas como na fabricação de próteses ortopédicas (MANO; MENDES, 1999).

Alguns elastômeros possuem alto desempenho quando submetidos a estresse dinâmico e resistência a corte, rasgo, abrasão, óleo e solventes superior. São fabricados pelo processo de vulcanização (FORMELA et al., 2016; GOMES et al., 2009).

A vulcanização é o processo pelo qual a união química das cadeias poliméricas que estão dispersas em meio líquido, se rearranjam através de ligações cruzadas, com objetivo

de formar uma rede de ligações elásticas tridimensional, que propicia a formação de um produto final com características elastoméricas almejada. Há três estagios distintos para se obter o elastômero em sua fase sólida que são as fases de indução e vulcanização em algumas aplicações e faz-se o uso da sobrecura (COSSA; SIRQUEIRA; SOARES, 2009).

Na fase de indução há pouca ou nenhuma formação de ligações cruzadas, pois necessita de um agente de cura, pode ser utilizado para a vulcanização a temperatura ou a utilização de um catalizador, depende do método a ser empregado e da propriedade química da borracha. O processo de vulcanização ocorre quando há o consumo dos aditivos presentes na reação, são portanto, consumidos formando as ligações cruzadas. Esse processo se torna mais lento com o tempo até a sua estabilização, logo o processo de cura torna-se completo. O processo de sobrecura é um método utilizado após ser feito o método convencional de cura, é aplicado para tornar a borracha mais rígida ou dependendo de suas propriedades químicas, pode tornar a borracha mais macia (LIMA; OLIVEIRA; COSTA, 2015; W. et al., 2017).

O processo de vulcanização é feito geralmente com adição de um catalizador, que acelera a reação. Pode ser utilizado para a vulcanização polímeros mistos ou denominado blends poliméricas, que podem ser sistemas miscíveis ou imiscíveis. Os sistemas miscíveis são unifásicos, ou seja, denotam uma compatibilidade total entre os componentes dentro de uma faixa de composição e de temperatura, denominadas como ligas poliméricas. Essa aplicação de mistura de componente é importante para alterar determinadas características do elastômero tornando-as mais macios e podendo diminuir o custo (CAL et al., 2012).

Os elastômeros podem ser caracterizados por diversos fatores, dependendo, principalmente, de sua aplicabilidade. Os principais testes de caracterização das propriedades mecânicas dos elastômeros no trabalho para a análise serão a dureza, resiliência e resposta elastoplástica à compressão (LIMA; OLIVEIRA; COSTA, 2015).

### 2.1.1 Dureza

É uma medida que refere-se a resistência que determinado material possui, propriedade dependente do módulo de elasticidade e da viscoelasticidade do material. Para tanto, utiliza-se de normas técnicas para padronizar e quantificar a dureza para as borrachas e plásticos, sendo denominadas de *Shore A* e *D* (LEE et al., 2017).

A nomenclatura de *Shore A* refere-se aos materiais macios, exprime o quanto a borracha é flexível, já *Shore D* trata de materiais duros. Essas medidas são obtidas por um dispositivo denominado de durômetro, que é composto por uma base de apoio, um penetrador, um dispositivo indicador e uma mola de calibração. A Tab. (1) apresenta os valores de dureza *Shore A* (PUSZKA; KULTYS, 2017).

O valor de dureza é uma representação insuficiente. São necessárias de outras características para representar e quantificar determinado material, pois a dureza tem significado

Tabela 1 – Classificação dos elastômeros quanto à dureza Shore-A do material.

<b>Classificação</b>	<b>Dureza (SHORE-A)</b>
Muito macia	inferior a 40
Macia	40-60
Média	60-75
Dura	75-90
Muito dura	90-100

Fonte: adaptado de (CAETANO, 2010-2014)

pouco expressivo para escolha da melhor aplicação que determinado material possui. utiliza-se outros parâmetro complementares como a tensão de ruptura e seu alongamento (ROGULSKA; KULTYS; PIKUS, 2017).

### 2.1.2 Resiliência

Resiliência dos materiais relaciona-se à capacidade do material retornar a sua forma original quando é aplicada uma grandeza de força sobre a sua superfície, devido ao seu comportamento elástico, ou seja, a quantidade de energia é devolvida após a deformação, devido aplicação de determinada tensão. A resiliência é a perda de energia durante um ciclo de deformação e recuperação dessa energia no mesmo ciclo, logo pode ser entendida como a memória do material (ASHRAFIZADEH; MERTINY; MCDONALD, 2016).

### 2.1.3 Resposta elastoplástica à compressão

Na análise da resposta elastoplástica de um determinado material, pretende-se avaliar as características de deformação no objeto de estudo quando se aplica determinado nível de tensão, normalmente, uniaxial (ROGULSKA; KULTYS; PIKUS, 2017; ASHRAFIZADEH; MERTINY; MCDONALD, 2016).

Em solicitações de tensões em níveis relativamente baixos para a maioria dos materiais clássicos como os metais, a tensão  $\sigma$  e a deformação  $\varepsilon$  são proporcionais, obedecendo a lei de Hooke uniaxial ( $\sigma = E\varepsilon$ ), sendo  $E$  é o módulo de elasticidade, ou módulo de Young. Acima de certos níveis de tensão, os materiais começam a se deformar plasticamente, ou seja, ocorrem deformações permanentes, conforme exposto na Fig (1a).

Para alguns materiais a região de deformação elástica e de deformação plástica são bem definidas e fáceis de serem analisadas, (Figura 1a). Contudo, alguns materiais poliméricos, dentre eles os elastômeros, (Figura 1b), apresentam características de um sólido elástico e ao mesmo tempo características de um fluido, essa propriedade é definida como viscoelasticidade, (CHANDRA; BIPINBAL; SUNIL, 2017; ZACHARIAH et al., 2016; JUNG et al., 2016).

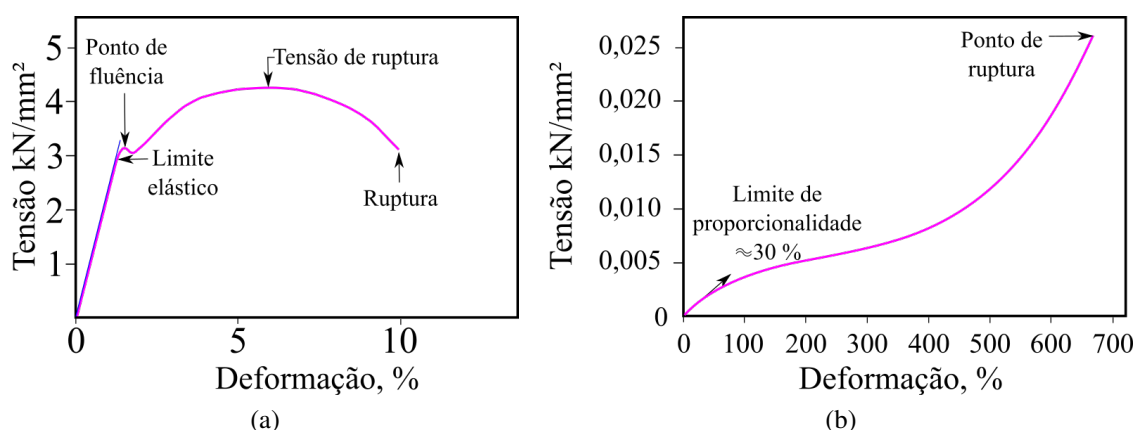


Figura 1 – **Curva Tensão-Deformação**. a) resposta elastoplástica para um material metálico e b) resposta elastoplástica para um elastômero. Fonte (CAETANO, 2010-2014).

## 2.2 HEVEA BRASILIENSIS

### 2.2.1 Propriedades do Látex

A borracha de látex tem importância mundial para aplicações na indústria, pois possui características únicas como o alongamento ou retração com mudanças insignificantes do seu estado inicial principalmente quando já está em seu estado vulcanizado (LIYANAGE et al., 2017) (R. et al., 2017).

A borracha natural foi conhecida pelos Europeus no período da (1493-1496) segunda viagem de Cristovão Colombo à América do Sul, em que se viu nativos utilizando-a para jogar em forma de bola. O látex é um polímero cis-poli-isopreno obtido de árvores, diversas espécies botânicas o possuem pois o látex tem por função atuar na proteção da árvore em eventuais avarias que o tronco possa sofrer, coagulando para fechar a ferida, impedindo a entrada de eventuais doenças que possam extinguir a planta. Porém a espécie conhecida que tem potencial comercial e econômico é a *Hevea Brasiliensis*, que é produzida pela árvore conhecida como seringueira, pertencente à família das euforbiáceas (CHEN et al., 2017).

A borracha natural antes da vulcanização apresenta peso molecular na ordem de  $10^5 - 10^6$  n, com densidade em média de  $0,92 \text{ g/cm}^3$ , com baixa cristalização, e é considerado um material termoplástico. Seu aspecto é uma solução aquosa e com viscosidade elevada e propriedades mecânicas baixas (S. et al., 2017).

Após o processo de vulcanização o látex vulcanizado torna-se um material termorrígido, que possui boa resistência mecânica, grande elasticidade e baixa deformação permanente. Pode ser utilizado em pneus de grande porte, em aviões e máquinas pesadas como o trator, na fabricação de luvas cirúrgicas e elásticos. Porém não é recomendável sua utilização em contato com líquidos ou gases apolares (W. et al., 2017).

O látex que é utilizado comercialmente é conhecido como borracha de seringueira, a sua

identificação comercial é feita pela sigla (NR). É nativa da região Amazônica do Brasil, porém é encontrada em grandes plantações nos estados de São Paulo e na Bahia. Adaptou-se muito bem a região do Sudeste Asiático na região da Malásia, Indonésia e Sri Lanka, as matrizes da planta serigueira, foram encaminhadas por volta de 1876 a essa região. O que tornou o Brasil pouco expressivo na produção da borracha uma vez que até o início século XX era o único produtor de látex (HUNUPOLAGAMA et al., 2017; ROY et al., 2017).

### 2.2.2 Vulcanização do Látex

Na borracha natural pode ocorrer a coagulação do látex, que é um processo natural, para ter um material com propriedades físicas melhores é necessário ser empregado a vulcanização, pode ser utilizado o método de desidratação. No método da desidratação é preciso que se modele o látex da maneira que se almeja aplicá-lo. Para aplicação industrial para se obter melhor eficiência do processo de vulcanização é usual a aplicação do método que utiliza o enxofre como agente de vulcanização (ZAIMOVA; BAYRAKTAR; MISKIOGLU, 2016).

O processo de modelagem depende da finalidade que se deseja aplicar a borracha natural, pode ser feito por vazamento, ficção por fusão, compressão, injeção, calandragem, extrusão, sopro, termoformação, fiação seca, fiação úmida e imersão, etc (MANO; MENDES, 1999).

## 2.3 MODELAGEM MATEMÁTICA POR GRÁFICOS DE LIGAÇÃO

Para descrever o comportamento de um sistema físico, deve-se, primeiro, conceber um modelo conceitual (ou idealizado) desse sistema. Um modelo matemático pode ser entendido como formulações que expressam as características essenciais de um sistema em termos matemáticos, portanto, o desafio em modelagem matemática é produzir o modelo mais simples possível que incorpore as principais características do fenômeno de interesse (BRASIL; BALTHAZAR; GÓIS, 2015; OLIVEIRA, 2016).

Dentre as técnicas de modelagem, em geral, é necessário encontrar mecanismos que permitam construir modelos que utilizem conceitos da modelagem teórica e da modelagem empírica (AGUIRRE, 2007). Neste trabalho é proposta a utilização da teoria do gráfico de ligação ou *Bond Graph* (BG) para tentar modelar a resposta dinâmica na análise dos elastômeros devido a forças puramente compressivas, objetivando obter a descrição matemática e o comportamento do modelo proposto, comparando a convergência do modelo matemático com a resposta experimental.

A teoria do BG é uma representação unificada de sistemas dinâmicos, no qual os elementos interagem entre si por meio de portas alocadas dentro do sistema, onde ocorrerá a troca de energia (KARNOPP; MARGOLIS; ROSENBERG, 2000; ALTOÉ; ROSA, 2013; ROSA et al., 2014). A técnica BG para a modelagem de sistemas dinâmicos é baseada no conceito de energia e pode ser aplicada a diferentes sistemas com diferentes domínios físicos, tais como o

mecânico, o elétrico, o térmico, o hidráulico, o acústico, dentre outros (PETERS, 2015; JHA; CHATTI; DECLERCK, 2017; REYES; RIDEOUT; BUTT, 2016).

Portanto, a técnica de modelagem via BG visa representar a troca de energia entre componentes de um sistema físico, onde a variável energia é caracterizada pelas variáveis integradas de esforço e de fluxo acumulados (KARNOPP; MARGOLIS; ROSENBERG, 2000).

Na junção física por onde ocorre a transferência de energia entre os componentes de um sistema, a potência instantânea  $\mathbb{P}$ , é representada por duas variáveis dinâmicas, a variável esforço  $e$  e a variável fluxo  $f$ , Eq. (1).

$$\mathbb{P} = ef \quad (1)$$

Resultados disponíveis em (PETERS, 2015) evidenciam que os componentes utilizados na modelagem via BG são classificados pelo seu comportamento energético e por sua função dentro do sistema.

O elemento do tipo  $R$  é abordado de forma genérica para os diferentes domínios de energia e esse elemento dissipa energia, como os resistores no domínio elétrico e amortecedores no domínio mecânico translacional. A Eq. (2) relaciona o elemento do tipo  $R$  com o de esforço  $e$  e fluxo  $f$ .

$$e = Rf \quad (2)$$

O elemento do tipo  $C$  tem por característica armazenar energia sem perdas, como por exemplo, molas no domínio mecânico translacional e capacitores no domínio elétrico.

A Eq. (3) relaciona o elemento do tipo  $C$  com o esforço  $e$  e fluxo acumulado  $q$ . Este elemento apresenta também a relação  $f = \dot{q}$ ;

$$e = \frac{1}{C}q \quad (3)$$

O elemento do tipo  $I$  também tem por característica armazenar energia, como a massa no domínio mecânico translacional e o indutor no domínio elétrico. A Eq. (4) relaciona o elemento do tipo  $I$  com fluxo  $f$  e o esforço acumulado  $p$ . Este elemento apresenta também a relação  $e = \dot{p}$ .

$$f = \frac{1}{I}p \quad (4)$$

Para que o método de modelagem via BG seja montado é necessário interligar os componentes e ligações através de elementos de junção onde ocorre o acúmulo ou dissipação de energia. Estes elementos têm a função de relacionar as variáveis de potência que estão ligadas a eles (FERNANDES, 2011).

No domínio mecânico translacional tem-se as seguintes considerações sobre as junções:

- Nas junções do tipo 0 o somatório dos fluxos é nulo ( $\sum f_i = 0$ ), ou seja, o fluxo que entra na junção 0 é igual aos fluxos que saem da junção 0, de forma análoga ao que acontece com a corrente elétrica em circuitos em paralelo. Nessa junção os esforços são iguais ( $e_1 = e_2 = \dots = e_{n-1} = e_n$ ) e também podemos fazer uma analogia ao circuito paralelo onde as tensões serão iguais.
- Nas junções do tipo 1 o somatório dos esforços é nulo e os fluxos são iguais, ou seja, é uma junção analogamente inversa à junção do tipo 0 e semelhante a Lei de Kirchhoff das tensões.

Outra importante variável a ser analisada na metodologia BG é a causalidade, ela permite indicar se os elementos conectados estão recebendo ou fornecendo as variáveis de potência, esforço e fluxo, indicando a relação de causa e efeito entre as variáveis de potência (FERNANDES, 2011).

A metodologia de obtenção do modelo via ferramenta BG pode ser definida em três passos: especificar o sistema análogo com base no modelo físico real, determinar os domínios de energia e definir a simplificação de hipóteses e as variáveis de entrada e saída do sistema (ALTOÉ; ROSA, 2013; ROSA et al., 2014; OLIVEIRA, 2016).

Portanto, pode ser aplicado o modelo via ferramenta BG, conforme Figura 2.

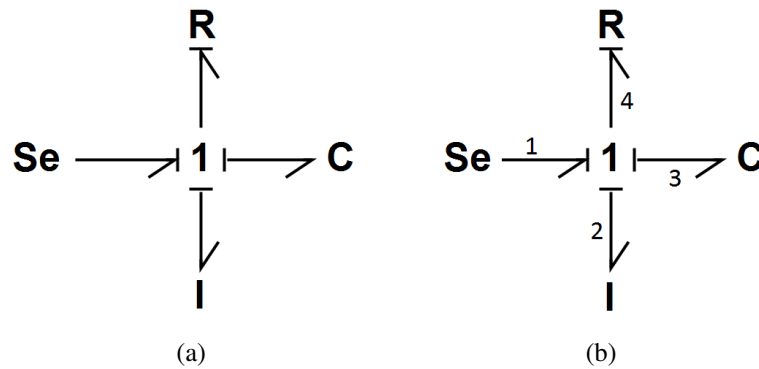


Figura 2 – **Representação em Bond Graph para o sistema análogo do elastômero.** a) diagrama BG e suas relações de causalidades obtidas via simulação no *software* 20-sim e b) a numeração imposta a cada ligação.

Em que a causalidade permite representar no *Bond Graph* quando cada elemento conectado está fornecendo ou recebendo as variáveis de potência, esforço e fluxo. A formulação do diagrama BG foi apoiada na utilização do *software* 20-sim, para obtermos a causalidade entre os elementos. O gráfico de ligação do sistema com as direções de energia e causalidade pode ser observado na Figura 2.

A dinâmica do sistema pode ser representada por gráfico de ligações que são utilizados para obter as equações de espaço de estado, pois o sistema foi representado por um BG. O



autor (PETERS, 2015) expôs em seu trabalho o procedimento e conceituação necessárias para utilização dessa modelagem, com definições e critérios a serem seguidos.

Como a seleção das variáveis do estado de entrada e de energia. Sendo que cada fonte fornece uma entrada, da qual fará parte do vetor  $u$  na equação  $\dot{x} = Ax + Bu$ . As variáveis de estado são determinadas pelas variáveis de armazenamento de energia independente. Se o elemento de energia independente for do tipo  $I$ , tem-se que a variável de estado será do tipo impulso generalizado, representado por  $p$ . Caso o elemento independente seja do tipo  $C$ , a variável de estado é um deslocamento generalizado, representado por  $q$ .

Ainda o junção dos esforços  $I$  e dos fluxos  $C$  formando um conjunto de equações iniciais para o sistema, onde o elemento  $R$  fornecerá as relação necessárias.

E por fim para formação do espaço de estado adequado e necessário equiparar o conjunto inicial de equações com o número adequado de equações para que se tenha uma solução para o sistema de equações gerados com o modelagem matamática.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 NORMAS TÉCNICAS

Nos testes experimentais e nas simulações computacionais foram adotados os requisitos estabelecidos nas normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) listadas abaixo:

1. ASTM D395 – *Standard Test Methods for Rubber Property - Compression Set* (ASTM, 2016);
2. ASTM D2240 – *Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness* (ASTM, 2015);
3. ASTM D575 – *Standard Test Methods for Rubber Properties in Compression* (ASTM, 2012).

Além das normas internacionais citadas, foram aplicadas todas as Normas Regulamentadoras (NR's) do Ministério de Trabalho e Previdência Social, em especial:

- EPI - NR N° 06 - Equipamento de Proteção Individual;
- STME - NR N° 12 - Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos.

#### 3.2 MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS

As características dimensionais dos elastômeros sintéticos e naturais foram desenvolvidas projetando dispositivos auxiliares, baseando-se nos critérios definidos nas normas técnicas adotadas. O processo de manufatura dos dispositivos necessários ao desenvolvimento dessa trabalho de conclusão de curso, foram realizados pela autora deste trabalho com o auxílio, do corpo técnico da Faculdade UnB Gama (FGA) da Universidade de Brasília (UnB).

A fabricação dos dispositivos necessários para execução dos procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Processo de Fabricação (LabPro) da (UnB) da (FGA).

Os moldes para a fabricação das amostras foram torneados em um torno do tipo CNC (*Computer Numeric Control*), de potência do motor de 10 Hp, velocidade com intervalo 12 a 3500 [rpm], produzido pela empresa Nardini modelo Logic 195, disponível no LabPro.

As peças utilizadas para o teste de compressão foram feitos em um Centro de Usinagem Vertical CNC (Controle Numérico Computadorizado), da marca Romi modelo D600, pertencente a FGA, presente no LabPro.

Foi utilizado um paquímetro com guia de titânio e leitura de  $(150 \pm 0,05)$  mm para obter as medidas lineares.

O teste dinâmico de compressão foi realizado no Laboratório de Materiais da FGA. Utilizou-se a máquina de ensaio *INSTRON 8801*,

Na realização dos testes dinâmico de compressão, foram observados as regras no laboratório e as normas citadas, bem como a utilização de proteção auricular devido ao excesso de ruído causado pela unidade hidráulica quando em operação.

### 3.3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Esta seção é dedicada a apresentar os dispositivos que foram confeccionados para a fabricação das amostras dos elastômeros sintéticos e naturais, os métodos desenvolvidos para a produção dos elastômeros sintéticos e naturais, além de apresentar como foram feitos os teste e dispositivos utilizados na realização dos três teste já mencionados, teste de dureza *Shore A*, teste de deformação permanente a compressão, e o teste dinâmico de compressão.

#### 3.3.1 Manufatura dos Acessórios

Para realizar os testes descritos nas normas ASTM D395, ASTM D2240 e ASTM D575 nos materiais em análise necessitam apresentar as características dimensionais semelhantes e possuir formato cilíndrico. As dimensões de espessura e de diâmetro devem estar entre  $(12,5 \pm 0,5)$  mm e  $(29,0 \pm 0,5)$  mm, respectivamente.

Com esta finalidade foi desenvolvido um cilindro com diâmetro interno de 29,5 mm, diâmetro externo de 36 mm e espessura de 13 mm, ou seja, este acessório está no limite superior de projeto. Desta forma, após o tempo de cura do elastômero, mesmo com o processo de retração, as amostras ficaram dentro do limite de projeto. Foi utilizado o polióxido de metileno para manufatura deste dispositivo e seu desenho técnico é apresentado no Apêndice C.2.

Para realizarmos o teste de deformação permanente à compressão, conforme descrito na norma ASTM D395 (Método B) é necessário que se realize compressão nos materiais em análise, reduzindo em aproximadamente 25% o valor de sua espessura original. Para este teste foram desenvolvidos os dispositivos cujos desenhos técnicos são apresentados no Apêndice B e sendo manufaturado em aço SAE 1045.

O último teste experimental implementado foi o teste dinâmico de compressão (ASTM D575). Para ensaiar as amostras no equipamento *INSTRON 8801* se fez necessário projetar e construir um acessório cilíndrico com dois diâmetros. Onde o diâmetro menor (16 mm) foi utilizado para fixação do dispositivo ao equipamento e o diâmetro maior (45 mm) foi o responsável pela compressão das amostras. Foi utilizado o aço SAE 1045 para manufatura deste dispositivo e seu desenho técnico é apresentado no Apêndice A.

### 3.3.2 Molgadem dos elastômeros sintéticos

Esta seção apresenta a metodologia aplicada para realizar a moldagem dos elastômeros sintéticos que foram analisados e testados conforme recomendação das normas adotadas.

Para facilitar a notação, as borrachas de silicone (elastômeros) serão descritas com a seguinte mudança de nome:

- Borracha de silicone Adesivo Azul PS - Elastômero Azul;
- Borracha de silicone BS ADESIVO Branco PS - Elastômero Branco;
- Borracha de silicone BS Platina Cristal A/B PS - Elastômero Platina.

Foram utilizados os materiais descritos abaixo para realizar a moldagem das amostras dos elastômeros Azul e Branco.

- 1 Balança digital (2000 X 0.1)g ;
- 1 seringa de 3ml com agulha;
- 1 seringa de 20ml;
- 1 palito para picolé;
- 4 moldes que estão descritos no Apêndice C.2;
- 1 placa de acrílico;
- 1 becker de 50 ml;
- catalisador PS-1 FR0,030kg - para o elastômero Azul;
- catalisador BX 3-8001 para o elastômero Branco;
- Elastômero Azul;
- Elastômero Branco.

Utilizou-se a balança digital para mensurar aproximadamente 40 g do elastômero e para obter a massa de catalisador, a massa do catalisador corresponde a aproximadamente 3% do valor da massa do elastômero.

Após o processo de medição das massas, o catalisador foi adicionado ao polímero com o auxílio de uma seringa. O palito de picolé foi utilizado para misturar o elastômero ao catalisador de modo manual em um becker de 50 ml.

Com ajuda da seringa de 20 ml foi dividido a mistura para os moldes que estavam sobre uma placa de acrílico. A placa de acrílico foi utilizado como a superfície plana e lisa. Pode ser utilizado para reter o polímero para o processo de cura qualquer superfície que seja fácil a retirada do elastômero após a seu processo de cura parcial. Foram utilizados 4 moldes idênticos, Apêndice C.2, sendo que três moldes foram utilizados para a moldagem definitiva e o quarto molde foi utilizado para depositar o material excedente. O material excedente foi utilizado para testar se as amostras poderiam ser retiradas das formas sem que houvesse a perda das amostras, pois adição do catalisador foi feita manualmente, o que poderia causar a má mistura do polímero com o catalisador que o fabricante disponibiliza para o processo de cura, conforme exposto na Fig. (3).

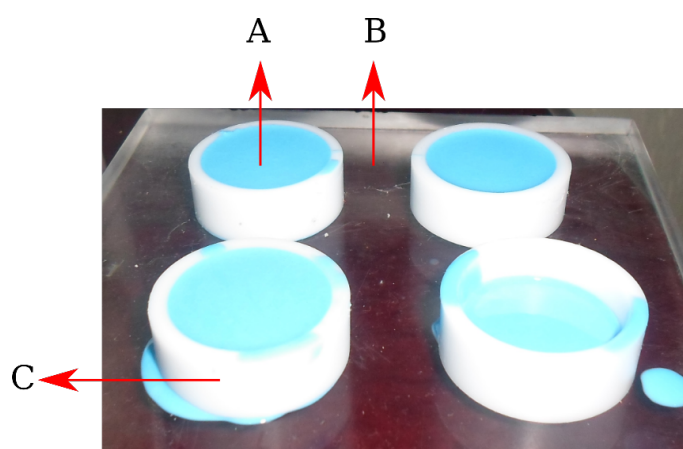


Figura 3 – **Moldagem dos elastômeros** – Moldagem do Elastômero Azul. Sendo **A** o elastômero, **B** uma placa de acrílico e **C** o dispositivo de moldagem.

O tempo para cura parcial da mistura para o Elastômero Azul foi de aproximadamente 4 horas.

O tempo para cura parcial da mistura para o Elastômero Branco foi de aproximadamente 2 horas.

Utilizou-se para confecção das amostras do Elastômero Platina a mesma metodologia desenvolvida para confecção das amostras anteriormente descritas, porém a Elastômero Plantina é composto por dois componentes, denominados A e B pelo fabricante, ou seja, não é utilizado catalisador. Foram usadas duas seringas de 20ml para ter uma proporção de cada componente a ser pesado, além do uso da balança para que a mistura tivesse uma proporção de (1:1).

Entende-se como cura parcial o tempo necessário para que a amostra de elastômero esteja em seu estado sólido, ou seja, que consiga retirar a amostra da forma onde foi confeccionada. O tempo de cura total é determinado através da medição de dureza *Shore A* da amostra, enquanto a amostra variar o valor de dureza considera-se que não foi concluído o seu processo de cura total.

Aguardou-se o tempo de cura parcial de 1 hora para retirar dos moldes.

O tempo de cura total para todos elastômeros foi de 5 dias.

### 3.3.3 Moldagem dos elastômeros naturais

Esta seção apresenta a metodologia aplicada para realizar a moldagem dos elastômeros naturais que foram analisados e testados conforme recomendação das normas adotadas.

Foram utilizados os seguintes materiais para realizar a moldagem das amostras de látex com variação de temperatura, e ainda em alguns casos variação de água: uma estufa digital p/ Esterilização e Secagem; uma seringa de 3ml; uma placa com moldes; uma placa de aço lisa; um becker de 50 ml; látex Bi Centrifugado e pré Vulcanizado e xícara de 240 ml.

As amostras de látex foram preparadas para três temperatura diferentes 80°, 60° e 40°. Para a temperatura de 80° ainda foi feita a variação do percentual de água na amostra, sendo acrescentado 20% e 40% de água. Para as amostras com temperatura de 60° e 40° não foi feita essa variação da porcentagem de água, pois o tempo para a vulcanização do látex é demorado e complexo, logo não houve tempo hábil para a fabricação das amostras.

A fabricação do látex com temperatura 80°C, 60°C e 40°C e sem adição de água será representado por 80C, 60C e 40C , respectivamente.

Para moldagem das amostras em látex foi desenvolvido o conjunto representado na Fig. (4). Esse dispositivo foi manufaturado em um Centro de Usinagem CNC. Na Fig. (4a) tem-se o fase intermediária de usinagem e na Fig. (4b) tem-se a usinagem finalizada.

Utilizou-se aproximadamente 100 ml de látex, com auxilio do becker (50ml) acionou a xícara duas medidas. Regulou-se a temperatura no primeiro dia da produção da amostra para 80°C. Em cada orifício da forma, que contém ao todo 9 orifícios, foi adicionado 1 ml de látex com ajuda da seringa que tem capacidade de 3ml, Fig. (4c) , aguardou-se aproximadamente 30 minutos para que fosse adicionado mais 1 ml do látex, esse processo foi repetido por aproximadamente 6 horas até completar por completo o volume do dispositivo, Fig. (4d), aguardou-se até o outro dia para o processo de vulcanização ficar completo para retirar as amostras da forma. Fez em seguida com adição de água ao látex na proporção de 20% e no outro dia de 40%, totalizando 3 dias para essa faixa de temperatura e percentuais de água.

O mesmo processo citado acima de fabricação foi repetido para temperatura de 60°C e 40°C, porém o tempo para acrescentar o látex foi aumentado para 1 horas e (2 a 4) horas, respectivamente, e o látex foi acrescentado de 2 em 2 ml. O processo de fabricação para a temperatura de 40°C foi feito em 2 dias.

Destacando que o processo de cura da amostra de látex foi feita pelo processo de desidratação, as medidas de dureza obtidas após sua confecção teve o mesmo valor ao longo dos 5 dias, considerando a relação de tempo de cura proposta para os elastômeros sintéticos, logo conclui-se que após a retirada da amostra da estufa a medição de dureza foi válida.

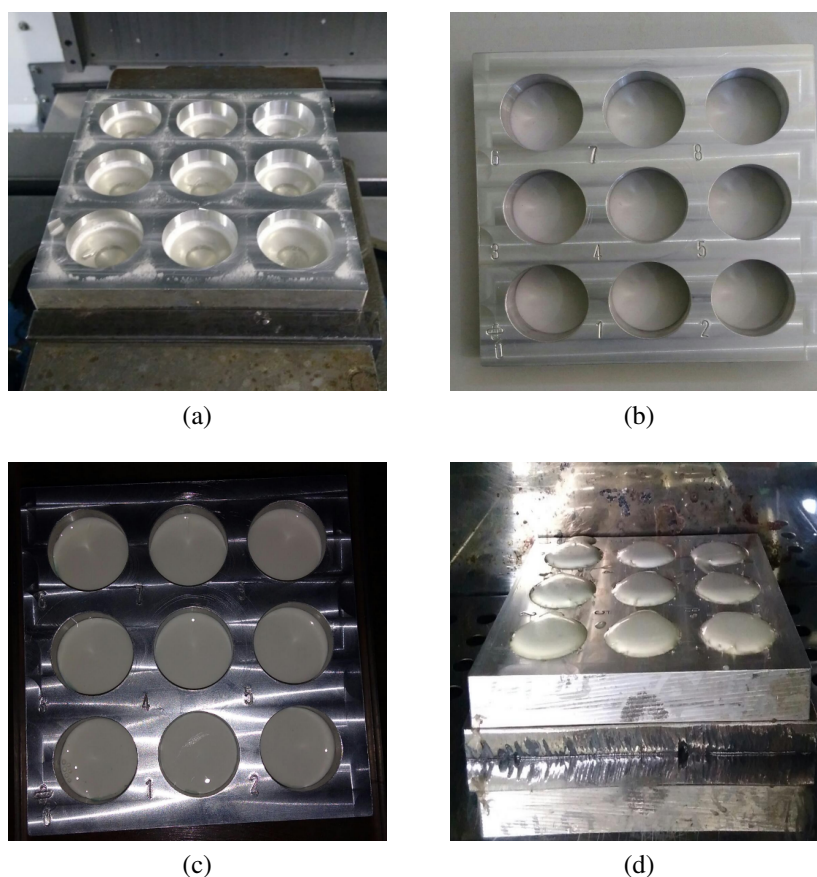


Figura 4 – **Processo de produção da forma para modelagem do elastômero natural e produção das amostras** a) forma para fabricação da amostra de látex sendo confeccionada, b) forma para fabricação da amostra concluída, c) início da fabricação da amostra do elastômero natural, d) forma totalmente preenchida para finalizar o processo de vulcanização do elastômero natural.

Para melhor compreensão da modelagem do elastômero natural é apresentado na Fig. (5) o fluxograma com resumo do procedimento.

### 3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.4.1 Metodologia do teste de dureza

O teste de dureza foi realizado seguindo a norma ASTM D2240 – *Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness*. Foi utilizado um Durômetro digital da marca TECNO com escala de dureza *Shore-A*.

A utilização do durômetro tem por objetivo medir o comportamento viscoelástico do material quando submetido a determinada penetração, ou seja depende do módulo de elasticidade e tem uma relação inversamente proporcional a penetração. O teste usa relação de dureza de indentação, porém não influencia nas propriedades fundamentais do elastômero.

As amostras foram preparadas conforme seção *Molgadem dos elastômeros*, após 24

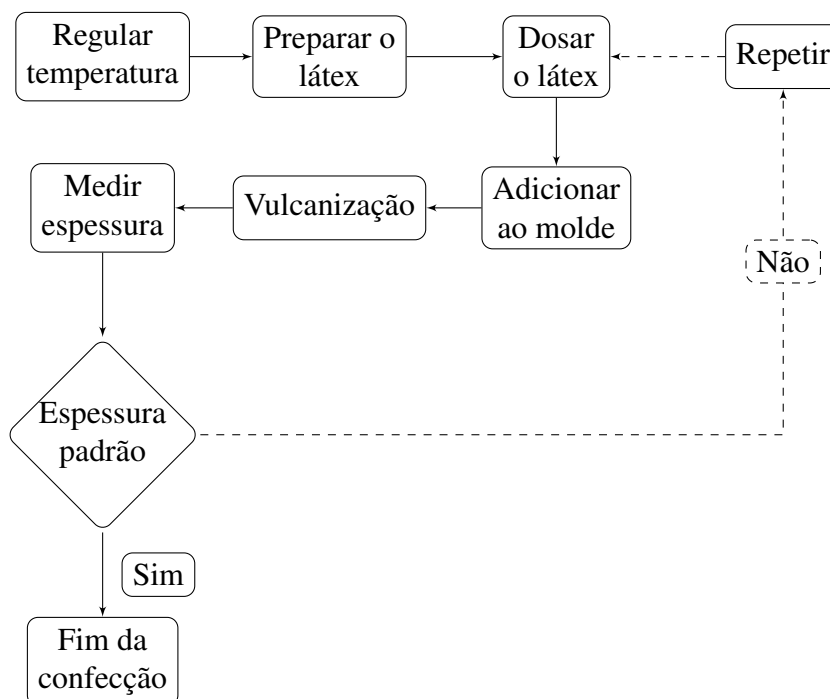


Figura 5 – Metodologia de vulcanização das amostras em látex.

horas da preparação da amostra foi feita a primeira medida com um durômetro, esse processo foi repetidos por 5 dias com intervalos de aproximadamente 24h, aferição da medida e sobre superfície nivelada e a dureza foi mensurada no centro da amostra em ambos os lados, ou seja, na direção axial ao cilindro.

### 3.4.2 Metodologia do teste de deformação permanente à compressão

O teste de compressão permanente é baseado na norma ASTM D395 é utilizado para descrever os aspectos do comportamento da borracha em aplicações de esforços de compressão em meio líquido ou ar. Comumente usado para obter as características que a borracha possui em aplicações de montagem de máquina, vibrações e vedações que a borracha pode suportar.

A norma técnica ASTM D395 descreve dois possíveis métodos, o método A que é feito por um conjunto de compressão sob força constante no ar e o método B que utiliza um conjunto de compressão sob deflexão constante no ar. A escolha do método a ser aplicado é opcional. O método escolhido para teste das amostras foi o método B que usa o conjunto de compressão sob deflexão constante no ar.

Para realizarmos o teste de deformação permanente à compressão, conforme descrito na norma ASTM D395 (Método B) é necessário que se realize uma compressão nos materiais em análise, reduzindo em aproximadamente 25% o valor de sua espessura original. Para realizar o exposto as amostras foram distribuídas entre as placas do dispositivo descrito no Apêndice B, de modo a que não encostassem nos espaçadores. Após o correto posicionamento das amostras o conjunto foi apertado por parafusos até que as amostras ficassem como a espessura do



espaçadores, conforme exposto no Fig. (6). Arbitrou-se que as amostras ficassem no dispositivo por aproximadamente 48h, pois a norma ASTM D395 em intervalo de de tempo (22 à 70) horas.

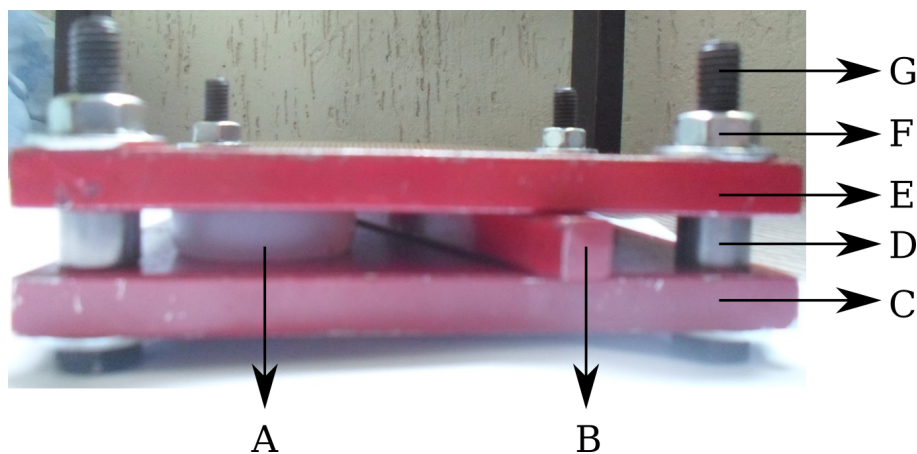


Figura 6 – **Teste de deformação permanente à compressão** – A) elastômero em teste, B) espaçador prismático, C) placa inferior, D) espaçador cilíndrico, E) placa superior, F) porca e G) parafuso.

O número mínimo de amostras ensaiadas no teste de deformação permanente à compressão foram de 3 unidades. O teste de compressão é um teste estático. Após as amostras foram retiradas do dispositivo após 48h e aguardou-se 30 minutos para medir a espessura.

Para quantificar a porcentagem de deformação plástica que a amostra teve, foi utilizado a Eq. (5) da norma ASTM D395.

$$C_B = \frac{t_o - t_i}{t_o - t_n} \times 100 \quad (5)$$

onde  $C_B$  representa o conjunto de compressão (método de ensaio B) expresso em porcentagem da deflexão original,  $t_o$  representa a espessura original da amostra,  $t_i$  representa espessura final da amostra e  $t_n$  representa a espessura do espaçador utilizado.

### 3.4.3 Metodologia do teste dinâmico de compressão

O teste dinâmico de compressão foi realizado no Laboratório de Materias da FGA, na máquina de ensaio *INSTRON 8801*. Para aplicação do método de compressão foi utilizado a norma técnica ASTM D575 que é utilizada para caracterizar o comportamento durante a compressão e deflexão para determinado compostos de borracha.

O teste tem por objetivo realizar a análise e a quantificação da medida de rigidez por compressão que pode ser aplicado em determinado composto de borracha não considerados como duros e esponjosos. A norma ASTM D575 cita dois tipos distintos de teste são eles:

- Método de Ensaio A - Ensaio de compressão de deflexão específica embasado em determinar a força resultante para causar uma deflexão específica na amostra;

- Método de Ensaio B - Ensaio de compressão em força específica apoia-se na compressão da amostra sobre massa específica ou força de compressão em que a deflexão é medida e registrada.

A escolha do método é opcional, logo foi escolhido o Método do Ensaio A, utilizando para esta finalidade uma velocidade de deslocamento do atuador hidráulico de  $20 \text{ mm/min}$ . Nesse teste foi analisado a resposta de cada elastômero em duas situações. Na primeira foi realizado uma redução de 25% da espessura inicial da amostra e na segunda análise foi adotado com um valor de redução de 50% da espessura inicial da amostra. Fez-se o procedimento para as triplicadas feitas de cada material, para assim obter os valores médios e seus respectivos desvios padrões amostrais.

O teste consiste em posicionar a amostra entre os dispositivos desenvolvidos, Apêndice A, de maneira a não se ultrapassar uma força de  $2 \text{ N}$  (pré-carga), conforme exposto na Fig. (7a e 7c). Após esse ajuste inicia-se o teste até a espessura da amostra ser reduzida em 25%, Fig. (7b), ou até a espessura da amostra ser reduzida em 50%, Fig. (7d). O valor de redução é configurado antes de se iniciar o teste dinâmico de compressão.

O teste não é destrutivo, pois de acordo com a literatura os elastômeros podem deformar-se até o dobro de sua espessura original. O método aplicado nas amostras tem por objetivo análise de rigidez dos diferentes elastômeros, sendo possível fazer uma comparação para verificar qual elastômero possui melhor capacidade de absorção de força quando submetido a determinada carga.

### 3.5 MÉTODO DE MODELAGEM VIA *BOND GRAPH*

Para se modelar um material viscoelástico matematicamente é necessário acrescentar ao modelo elementos que incorporem ambos os comportamentos. A fração elástica da deformação é representada normalmente por uma mola, pois nesse dispositivo a deformação sofrida é diretamente proporcional à tensão aplicada. A fração plástica normalmente é representada por um amortecedor, pois a tensão é diretamente proporcional à taxa de deformação.

Na modelagem do objeto de estudo via *Bond Graph* foi desenvolvido um sistema análogo, Figura 8b, baseando-se no teste dinâmico de compressão, Fig.(8a). No modelo análogo mecânico a massa  $m$  é o parâmetro que caracteriza a massa do elastômero que sofrerá uma ação de uma força externa  $S_e$ . Foi adotado também, o modelo de *Kelvin Voigt*, contendo uma mola com elasticidade  $k$  disposta em paralelo com um amortecedor de viscosidade  $b$ .

Então, para o modelo análogo proposto, a variável de entrada  $S_e$  será a força aplicada nos testes dinâmico de compressão e a saída será a resposta do elastômero.

Algumas considerações foram assumidas na modelagem do sistema como hipóteses simplificadoras:

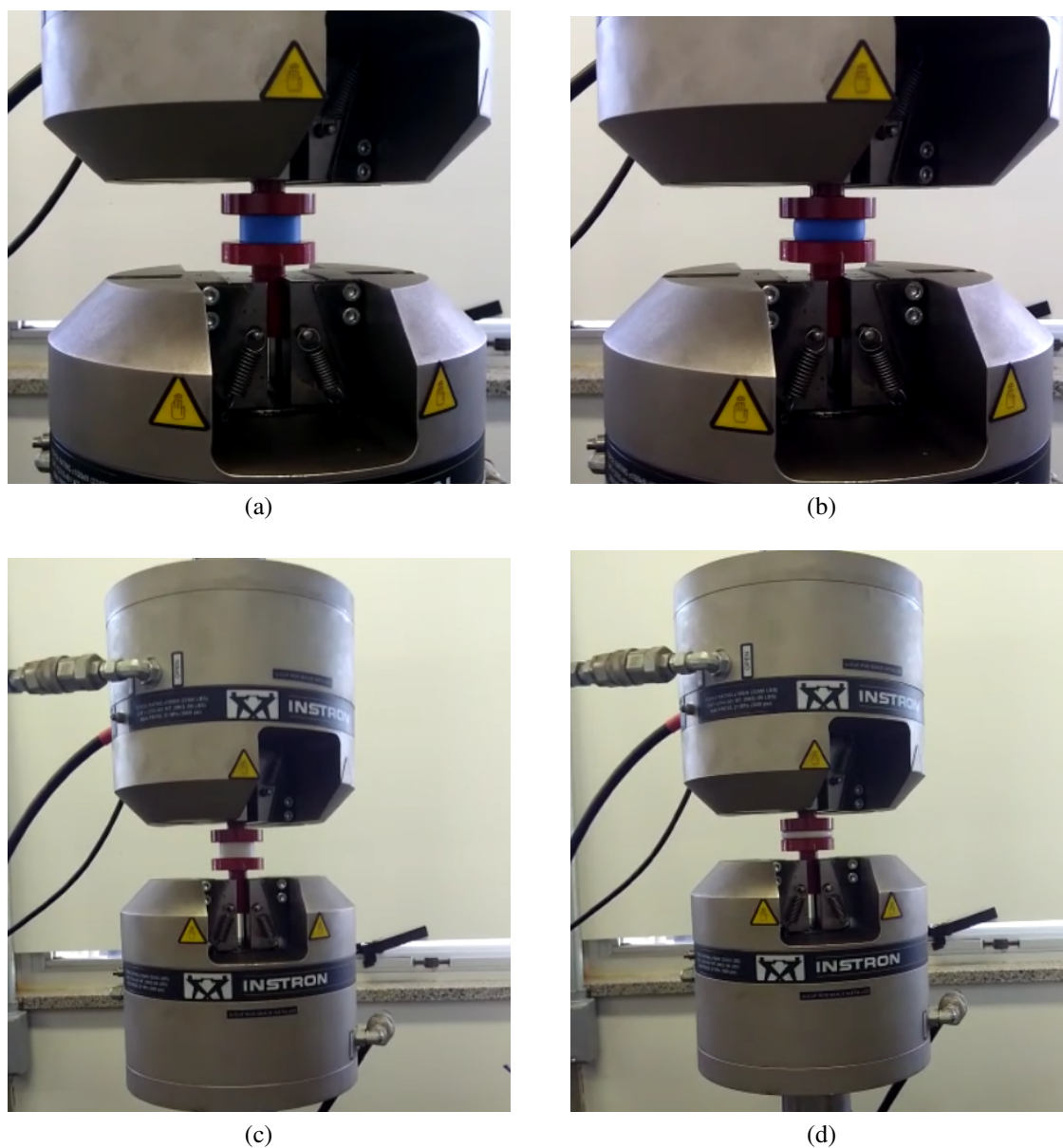


Figura 7 – **Teste dinâmico de compressão.** a) início do teste de compressão com redução de 25% do elastômero azul, b) fim do teste de compressão com redução de 25% do elastômero azul, c) início do teste de compressão com redução de 50% do elastômero branco, d) fim do teste de compressão com redução de 50% do elastômero branco.

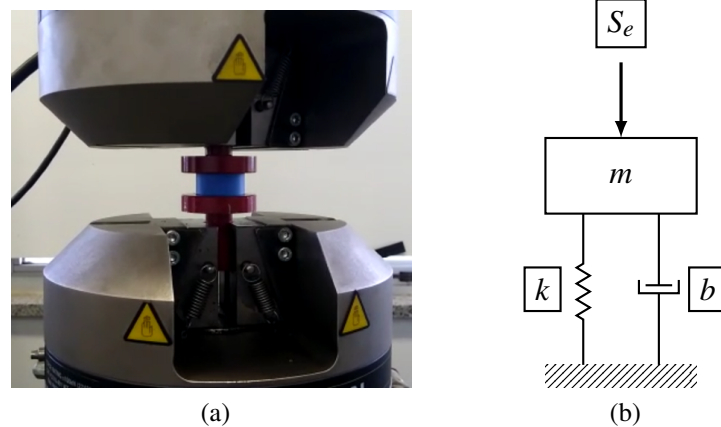


Figura 8 – **Correlação entre o modelo físico e o modelo análogo mecânico.** Em a) temos a representação física do teste dinâmico de compressão e em b) o sistema análogo mecânico proposto, sendo  $S_e$  a força externa atuante ao sistema,  $m$  a massa do elastômero,  $b$  e  $k$  representam o modelo de Kelvin Voigt.

- A mola com elasticidade  $k$  é constante e uniforme;
- O coeficiente de amortecimento viscoso  $b$  é constante e uniforme;
- O material da massa  $m$ , medida em  $kg$  do elastômero, é isotrópico;
- Não há ruídos no sistema;

Conforme resultados apresentados em (OLIVEIRA, 2016), a relação entre os elementos adotados e seu equivalente BG no domínio mecânico translacional que o elastômero se encontra são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Variáveis que compõem o modelo análogo e sua representação em BG .

Componentes	<i>Bond Graph</i>	Representação mecânica
$S_e$	Fonte	Força externa - input.
$C$	Capacitância	$(C = 1/k)$ representa a mola com constante elásticas $k$ .
$I$	Inércias	$(I = m)$ representa a massa do elastômero.
$R$	Resistências	$(R = b)$ representa a constante de amortecimento ou o coeficiente de amortecimento viscoso.

O procedimento para o desenvolvimento das equações é independente do domínio que é representado pelo gráfico de ligação. Aplicando o método descrito, obtém-se a Eq. (10) e a Eq. (11). Estas equações serão aplicadas na solução da modelagem via *Bond Graph* proposta e a solução desse sistema será apresentada na Fig. (8b).

Logo para determinar as variáveis de estado sabe-se que dependerá da variável  $C$  que a derivada do fluxo acumulado por representada por  $\dot{p}$  e a derivada do esforço acumulado  $I$  e representado por  $\dot{q}$ , tem-se o espaço  $x \in \mathbb{R}^2$ , pois existe somente duas variáveis de estado, são elas:

$$x_1 = \dot{p} = e_2 \quad (6)$$

e

$$x_2 = \dot{q} = f_3 \quad (7)$$

- A relação do elemento  $C$  é dada por  $e_3 = \frac{1}{C}q_3$
- A relação do elemento  $I$  é dado por  $f_2 = \frac{1}{I}p_2$
- A relação do elemento  $R$  é dado por:  $e_4 = Rf_4$

Da junção obtém-se as relações de fluxo Eq. 8 e esforço Eq. 9, respectivamente,

$$f_1 = f_2 = f_3 = f_4 \quad (8)$$

e

$$e_1 = e_2 + e_3 + e_4 \quad (9)$$

Para obtenção das Equações finais associadas ao sistema, tem-se voltar as Eq. 6 e Eq. 7, isolando  $e_2$  da Eq. 9 e determina-se os valores dos esforço de acordo com a Fig 8.

- $e_1 = Se$
- $e_3 = \frac{1}{C}q_3$
- $e_4 = Rf_4$

logo tem-se a análise do Estado dos esforços  $x \in \mathbb{R}^2$  na Eq. 10.

$$\dot{p}_2 = -\frac{R}{I}p_2 - \frac{1}{C}q_3 + S_e \quad (10)$$

Análogo ao que foi feito para obter o valor da variável de Estado para esforço, será feito para a variável de Estado de fluxo. Sabendo que  $f_3$  é igual a  $f_2$ , substituindo cada valor na variável de Estado Eq. 7, temos que análise do Estado de fluxo no  $x \in \mathbb{R}^2$ :

$$\dot{q}_3 = \frac{1}{I}p_2 \quad (11)$$

Adotando a metodologia proposta por (PETERS, 2015), tem-se que:

- O deslocamento generalizado  $q$  está diretamente relacionado com a posição da massa  $x_1$ .  
Portanto,  $x_1 = q_3 \Rightarrow \dot{x}_1 = \dot{q}_3$ ;
- O impulso generalizado  $p$  está diretamente relacionado com a velocidade da massa  $x_2$ .  
Portanto,  $x_2 = p_2 \Rightarrow \dot{x}_2 = \dot{p}_2$ .

Com o uso da metodologia adotada é possível estimar a resposta do protótipo quando for aplicada uma força de excitação (*input*)  $S_e$  e comparar com o resultado experimental.

Uma equação diferencial de ordem  $n$  pode ser representada por uma equação matricial-vetorial de primeira ordem. Então, o sistema de equações referentes a Eq. (10) e a Eq. (11), pode ser representada no formato  $\dot{x} = Ax + Bu$  do sistema análogo, Fig. (8b), é dada pela Eq. (12), admitindo interesse no deslocamento da massa, a solução pode ser determinada pela Eq. (13).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1/m \\ -k & -b/m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} S_e \quad (12)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

### 3.5.1 Análise de estabilidade

Uma das primeiras ações na análise da modelagem matemática via BG da resposta elastoplástica a compressão do objeto de estudo deste trabalho é analisarmos se o modelo é estável. Podemos definir um sistema como estável quando aplicamos um determinado módulo de força ou excitação e sua resposta converge em um intervalo de tempo finito (DORF; BISHOP, 2009).

Uma das formas de analisarmos a estabilidade de um sistema é verificarmos sua resposta quando o sistema é submetido ao um valor de força limitada e sua resposta for limitada em magnitude. logo a estabilidade sistema linear só é possível se sua resposta a impulso  $g(t)$  for integrada sobre um intervalo infinito for finito, ou seja, a integral de convolução para uma entrada limitada deve ser finita conforme exposto na Eq. (14) (DORF; BISHOP, 2009).

$$\int_0^{\infty} |g(t)| \quad (14)$$

Outro método de análise é estudarmos a função de transferência em malha fechada  $G(s)$  em especial a localização dos pólos e zeros. A função de transferência de forma simplificada pode ser entendida como uma função que relaciona a entrada do sistema com a saída do sistema em estudo (DORF; BISHOP, 2009).

A posição no plano  $s$  dos pólos implicam em uma resposta transitória, pois os pólos são as raízes do denominador da função  $G(s)$ . Para a estabilidade de um sistema os pólos tem que ser negativos devido ao coeficiente da exponencial da solução da transformada de Laplace, conforme exposto na Eq. (15) (DORF; BISHOP, 2009). Se os pólos forem positivos a solução não irá convergir, conforme exposto no termo da Eq. (16)

$$e^{-at} \tag{15}$$

$$e^{at} \tag{16}$$

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Para os testes experimentais apresentados neste capítulo, referentes as borrachas de silicone (elastômero sintético), foram moldadas nove amostras de cada elastômero Azul, Branco e Platina. A Tab. (3) apresenta como resultado os valores dimensionais médios dos cilindros moldados e as respectivas massas de cada material em análise, com o respectivo desvio padrão amostral.

Tabela 3 – Valores dimensionais e de massas do elastômeros sintéticos.

	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Massa (g)</b>
Azul	$29,22 \pm 0,10$	$12,29 \pm 0,12$	$10,52 \pm 0,42$
Branco	$29,36 \pm 0,16$	$12,47 \pm 0,35$	$9,61 \pm 0,23$
Platina	$29,38 \pm 0,07$	$12,64 \pm 0,36$	$9,46 \pm 0,26$

Para produção dos elastômeros naturais foram produzidos quantidades mínimas de 9 amostras para cada configuração de temperatura e concentração de água implementados no método de vulcanização. A Tab. (4) apresenta como resultado os valores dimensionais médios dos cilindros moldados em látex e as respectivas massas de cada material em análise, com o respectivo desvio padrão amostral.

Tabela 4 – Valores dimensionais e de massas do elastômeros naturais.

	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Massa (g)</b>
látex 40°C (0% de água)	$28,70 \pm 0,16$	$12,88 \pm 0,10$	$7,34 \pm 0,08$
látex 60°C (0% de água)	$28,62 \pm 0,12$	$12,81 \pm 0,15$	$7,18 \pm 0,13$
látex 80°C (0% de água)	$28,77 \pm 0,21$	$12,51 \pm 0,37$	$6,49 \pm 0,17$
látex 80°C (20% de água)	$28,66 \pm 0,15$	$12,50 \pm 0,26$	$6,57 \pm 0,14$
látex 80°C (40% de água)	$28,72 \pm 0,19$	$12,82 \pm 0,42$	$6,41 \pm 0,15$

Da análise dos resultados apresentados na Tab. (3 e 4), conclui-se que a metodologia de moldagem dos elastômeros sintéticos e naturais apresentam um boa característica dimensional, pois os valores de diâmetro e espessura estão em conformidade com as normas ASTM adotadas neste trabalho.

### 4.1 TESTE DE DUREZA

#### 4.1.1 Dureza silicone

A dureza é a quantificação da resistência á penetração, por exemplo um elastômero possui um grau de dureza inferior a outros materiais utilizados em aplicações de materiais para



engenharia, como os materiais vítreos, cerâmicos e outros, por isso é importante testar o valor de dureza e ter conhecimento para eventuais aplicações do elastômeros.

Os valores das medidas de dureza *Shore A* finais foram mensuradas durante um período de 5 dias após sua preparação, tendo por objetivo ter a estabilização da dureza de cada elastômero, para assim se obter um valor de média final. A denominação de Face A ou Face B das amostras referem-se ao seu posicionamento no processo de cura dos elastômeros sintéticos. Foi utilizado na fabricação das amostras molde cilíndrico vazado e uma superfície de acrílico. Logo, a Face A é a parte do elastômero que ficou em contato com acrílico (superfície inferior), e Face B a parte do elastômero voltada para o ambiente (superfície superior), durante o processo.

O valor de dureza foi testado em todas as amostras produzidas, foram fabricadas em média 9 amostras de cada elastômero sintético, retiradas assim as medidas das duas faces da amostra, ao final obteve-se o valor médio para ambos os lados das amostras analisadas. Para amostra de elastômero azul o valor médio foi de  $(13,73 \pm 0,98)$ , branco  $(11 \pm 1,40)$  e platina  $(9,03 \pm 1,66)$  de dureza *Shore A*. Os resultados do teste são apresentado na Fig. (9).

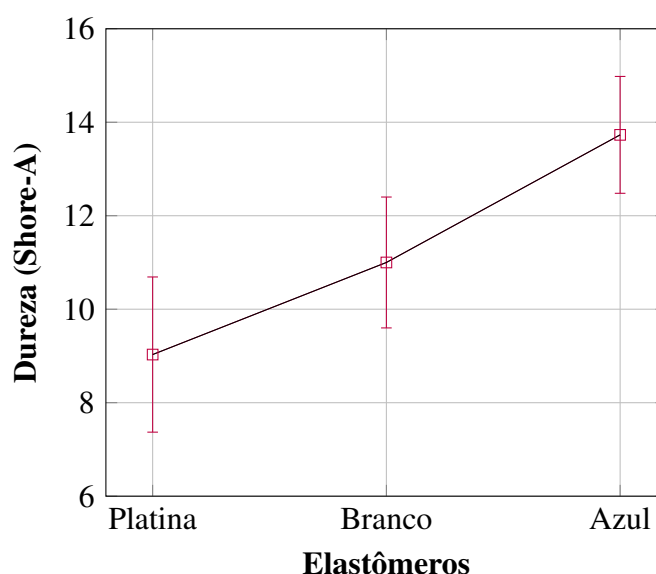


Figura 9 – **Ensaio de dureza Shore-A dos elastômeros sintéticos.** Relação de dureza médias e seus respectivos desvios padrões nos elastômeros ensaiados.

Na análise dos dados experimentais da Fig. (9), conclui-se que o elastômero Platina possui a menor dureza Shore-A dentre os elastômeros analisados.

Para análise do resultado contido na Fig. (9) tem-se que o elastômero Azul possui dureza maior que o elastômero Branco, quando analisa-se seus respectivos valores médios de dureza. Contudo, analisando os desvios padrões amostrais nos limites inferiores e superiores das durezas dos elastômeros Azul e Branco, tem-se que a menor dureza do elastômero Azul foi de 12,74 Shore-A e a maior dureza do elastômero Branco foi de 12,40 Shore-A, portanto temos que o elastômero Branco possui menor dureza que o Azul, se analisarmos a dureza Shore-A com precisão centesimal, se reduzirmos para uma medida com acurácia decimal temos que am-

bos os elastômeros possuem a mesma dureza na região limite de cada valor ensaiado. Portanto, não podemos afirmar qual, dentre esses dois materiais analisados possui maior ou menor dureza entre si, conclui-se apenas que a dureza do Elastômero Platina é a menor dentre as analisadas.

Outra análise relevante dos dados experimentais apresentados na Fig. (9) é que existe uma relação aproximadamente linear dos valores aferidos nas diferentes amostras de elastômeros.

Os valores de dureza Shore-A informados pelo fabricante para os elastômeros Azul, Branco e Platina são de 14, 12 e (9-10), respectivamente. Os valores medidos experimentalmente estão na faixa de valores do fornecedor. Conclui-se então que a metodologia proposta para a medição da dureza de elastômeros é eficaz e pode ser aplicada a outros elastômeros de uso não industrial ou que não possuam este tipo de informação documentada. É ainda que o valores obtidos de dureza *Shore A* dos elastômeros sintético é classificado como um material muito macio, ou seja, valor de dureza inferior a 40.

#### 4.1.2 Dureza látex

Na Fig. (10) temos a relação de dureza médio do elastômeros naturais com relação a variação de temperatura e ainda devido a adição de água para a temperatura de 80°C. O valores médios obtidos para amostra de 80°C de  $(27,78 \pm 1,51)$ , 60°C de  $(24,67 \pm 1,79)$  e 40°C de  $(23,36 \pm 2,34)$  de dureza *Shore A*.

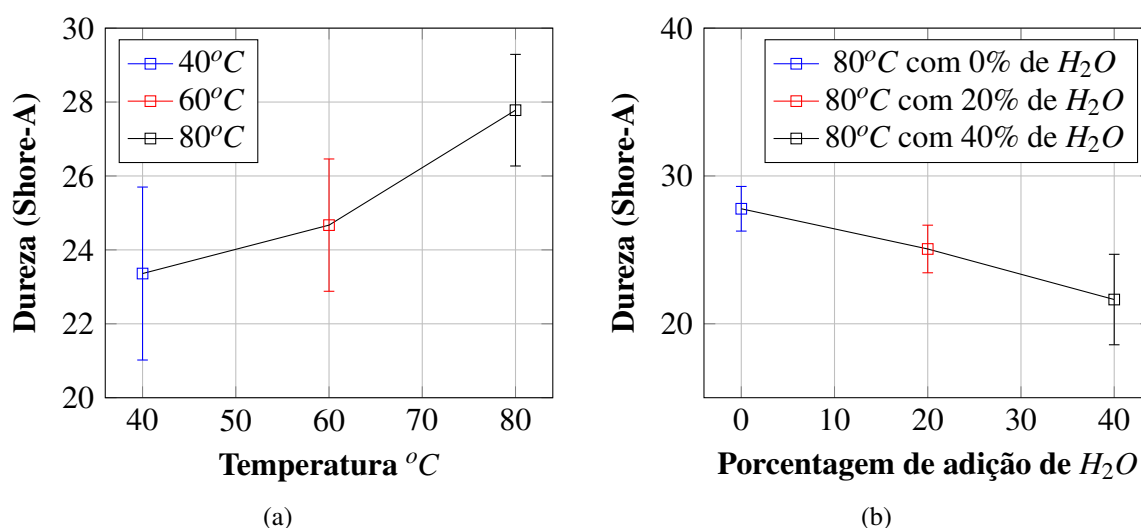


Figura 10 – **Ensaio de dureza Shore-A dos elastômeros naturais.** Em a) temos a relação de dureza médias e seus respectivos desvios padrões no látex vulcanizados sem adição de água a temperaturas de 40°C, 60°C e 80°C e em b) temos a relação de dureza médias e seus respectivos desvios padrões devido ao processo de vulcanizados com adição de água de concentração de água de 0%, 20% e 40% para a temperatura de 80°C.

Na Fig. (10a) tem-se a relação de aumento da dureza em processos de vulcanização a temperatura diferentes, as amostras tendem a apresentar maior grau de dureza quando o pro-

cesso de vulcanização é realizado a temperaturas a 80°C e pode ser observado uma tendência linear de aumento da dureza com aumento da temperatura de vulcanização.

Na Fig. (10b) nota-se que as amostras tendem a diminuir a sua dureza quando se adiciona água para a temperatura de 80°C, apresentando também um comportamento linear, para o acréscimo de água a amostra tende a ter um decréscimo de dureza, pode ser visto que para adição de 40% de água na temperatura de 80°C a amostra possui menor dureza *Shore A* média de aproximadamente 24, porém pode ser visto que a barra de desvio padrão associado as medidas é maior em relação as médias das demais medidas obtidas o que implica em maior variação dos valores encontrados. Os valores médios obtidos para as amostras com adição de água a temperatura de 80°C foi de  $(27,78 \pm 1,51)mm$  para amostra com 0% de água, de  $(25,06 \pm 1,61)mm$  com 20% de água e  $(21,64 \pm 3,06)mm$  para amostra com 40% de água adicionado.

Conclui-se que a dureza *Shore A* do elastômero natural é classificado como um material muito macio, ou seja, valor de dureza inferior a 40 *Shore A*.

## 4.2 TESTE DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE À COMPRESSÃO

Os teste de deformação permanente à compressão nos elastômeros naturais e sintéticos têm por objetivo medir a deformação permanente quando aplicado uma determinada carga, tendo portanto a análise das respostas plástica que cada tipo distinto de amostra possui quando submetida a determinadas tensões compressivas importantes para verificar o comportamento adverso de serviço.

A Fig. (11) apresenta que o elastômero Azul possui maior deformação que o elastômero Branco, quando analisa-se seus respectivos valores médios de deformação. Contudo, analisando os desvios padrões amostrais nos limites inferiores e superiores das durezas dos elastômeros Azul e Branco, tem-se que a menor deformação do elastômero Azul foi de 14,81 Shore-A e a maior deformação do elastômero Branco foi de 13,79 Shore-A. Portanto, não podemos afirmar qual, dentre esses dois materiais analisados possui maior ou menor dureza entre si, conclui-se apenas que a dureza do Elastômero Platina é a menor dentre as amostras analisadas.

A deformação e a quantificação da deformação plástica que amostra sofre, pode ser visto na Fig. (11) que a amostra platina possui maior absorção de energia quando submetida a compressão permanente, ou seja, sua região elástica é superior as das demais amostras testadas, tende portanto a retornar a sua espessura original, já as amostras Branca e Azul possuem praticamente a mesma região elástica e sofrem assim um maior grau de deformação plástica.

Na Fig. (12) é exposto a relação de deformação permanente em diferentes condições de vulcanização do látex, objetivando analisar a influência da temperatura e da adição de água nas amostras em estudo.

Nos resultados apresentados na Fig. (12a), observa-se um aumento da deformação permanente nas amostras em látex em relação ao acréscimo da temperatura. A variação de tempe-

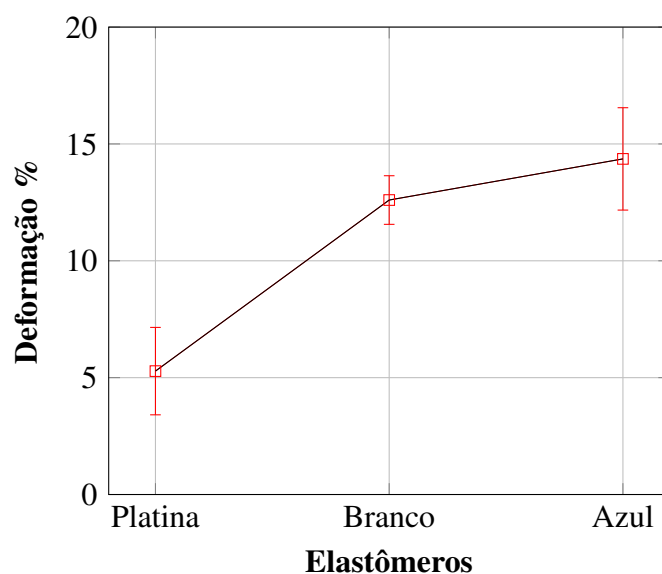


Figura 11 – **Deformação.** Valores de deformação em porcentagem calculadas com os valores de espessura obtidos experimentalmente.

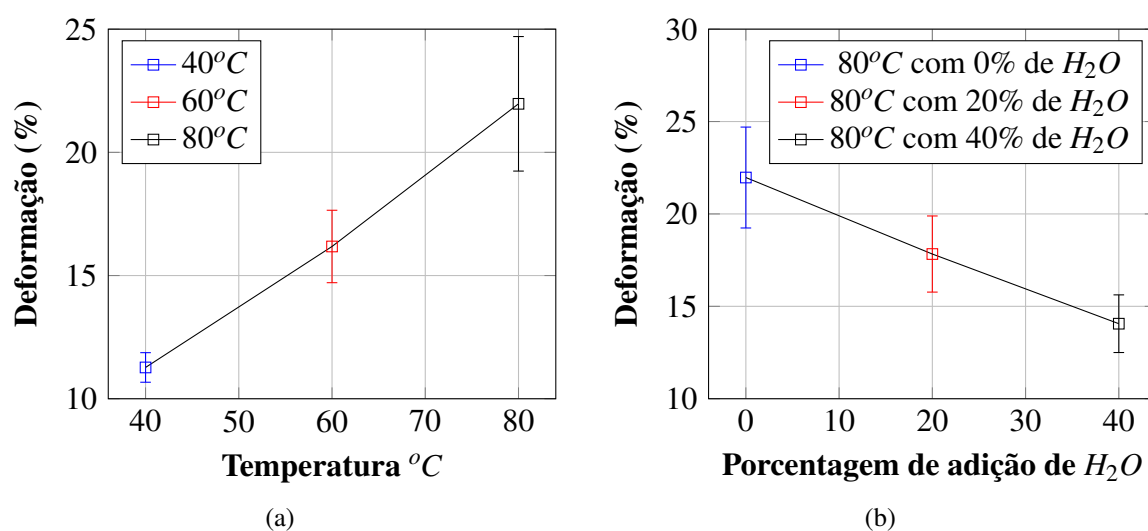


Figura 12 – **Ensaio de deformação permanente a compressão dos elastômeros naturais.** Em a) temos a relação médias das deformações permanente a compressão e seus respectivos desvios padrões no látex vulcanizados sem adição de água a temperaturas de 40°C, 60°C e 80°C e em b) temos a relação das médias das deformações permanentes a compressão e seus respectivos desvios padrões devido ao processo de vulcanizados com adição de água de concentração de água de 0%, 20% e 40% para a temperatura de 80°C.

ratura no seu processo de vulcanização, pode se notar que a configuração que apresenta menor taxa de deformação permante é a da amostra que foi vulcanizada a temperatura de 40 °C e o aumento na taxa de deformação é aproximadamente linear quando a temperatura do processo de vulcanização é elevada com incremento de 20°C até a temperatura de 80°C.

Já nos resultados da Fig. (12b) nota-se com adição de água no látex, tendo a mesma temperatura de 80°C a um descréscimo de da deformação, e ainda tem-se uma relação de linearidade do percentual adicionado a amostra de látex.

### 4.3 TESTE DE DINÂMICO DE COMPRESSÃO

O ensaio de compressão dinâmica foi feito para verificar a relação de resposta que as amostras de elastômeros possuem quando submetidas a determinados valores de deslocamento, tendo uma percentual pré-fixado de 25% e 50% do valor inicial da espessura das amostras.

A resposta compressiva dinâmica dos elastômeros sintéticos podem ser observados na Fig (13a), tendo redução de 25% de sua espessura inicial, analisando as médias da amostra Azul e Branco, pode ser observado na Fig. (13a) que a amostra Branco tem uma deformação superior quando submetida a força de (20 a 40) N na faixa de (5 a 12,5)% de deformação e tende a ter um comportamento mais previsível até alcançar o limite estabelecido de deformação máxima a que foi submetido, que foi determinada como sendo 50% da espessura inicial, ou seja, a amostra possui 13 mm de espessura foi testada na máquina de tração até chegar a 6,5 mm de espessura. É possível visualizar no gráfico que a amostra platina é a que se deformou mais com uma quantidade menor de força, e quando a deformação é superior a 15% as amostras de dos elastômeros azul e branco estão bem próximos.

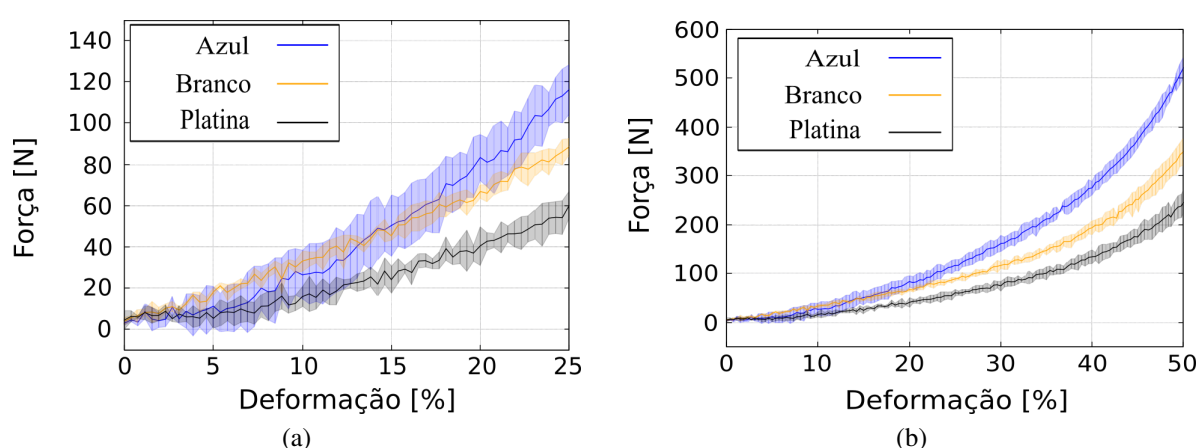


Figura 13 – **Resposta a dinâmica a compressão dos elastômeros sintéticos.** Tem-se a variação dos desvios padrões sombreado em torno dos valores médios obtidos representado pelas linhas a) Redução de 25% da espessura inicial. b) Redução de 50% da espessura inicial

Nos resultados da Fig. (13b) é possível inferir que os valores de deformação das amos-

tras de elastômeros sintéticos Azul e Branco possuem valores próximos. Ainda se nota que após as amostras serem sujeita a uma força de 150 N e tendo uma deformação superior a 25 %, as faixas de desvio padrão estão em torno dos valores médios encontrados de cada elastômero em análise. Nota-se também a tendência do comportamento dos elastômeros sintéticos de formar uma curva quadrática.

Nos resultados obtidos na Fig. (14a) pode se inferir que a proporção da força pela deformação que o látex sofre são próximos entre as amostras testadas, o que não houve diferença significativa nas deformações com as temperaturas de 40°C, 60°C e 80°C, logo não há possibilidade de inferir a respeito de seu comportamento para o gráfico em análise.

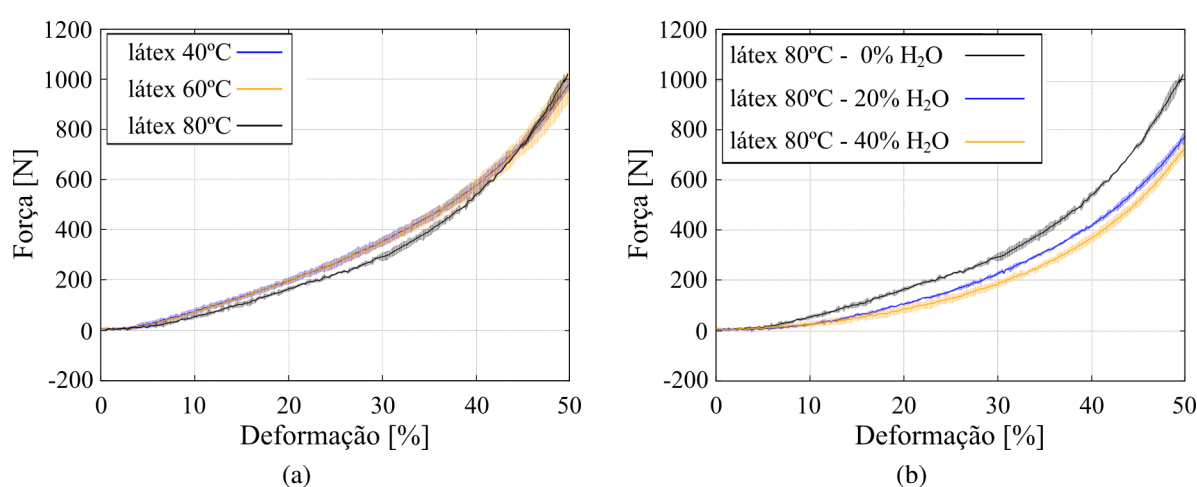


Figura 14 – **Resposta a compressão com redução de 50% da espessura.** a) Médias e desvios padrões da borracha natural com variação da temperatura de 40°C, 60°C e 80°C e sem adição de água. b) Médias e desvios padrões dos borracha natural com temperatura de 80°C e adição de água na proporção de 0%, 20% e 40%.

Analisando a Fig. (14b) para as amostras á 80°C com variação de porcentagem de água pode se notar uma melhor resposta compressiva em relação as demais amostras testadas do látex vulcanizado a temperaturas distintas, ou seja, é possível verificar diferenças entras as amostras. Quando o processo de vulcanização foi feito com temperatura média de 80°C e com adição de água, pode se notar nos resultados na Fig. (14b) que a amostra que possui maior quantidade de água (40%) também possui melhor resposta a compressão dinâmica, isso provavelmente devido ao processo mais lento de evaporação da água o que a acaba uniformizando o processo e tornando as amostras mais suscetíveis a compressão.

Logo pelo teste dinâmico de compressão a temperatura é um fator que não altera significativamente as propriedade mecânicas das amostras, porém para algumas aplicações na área da biomédica que é necessario um produto homogêneo e com aspecto do material seja mais claro é necessário que o processo de cura seja feito a temperaturas menores, em algumas aplicações como na produção do catete e da produção da membrana para correção do estrabismo, mencionados no estado da arte, os autores relatam sobre o controle da temperatura máxima para

desenvolvimento de seus trabalhos. Notou-se que as amostras que foram vulcanizadas a temperatura de 80°C tinha coloração mais escura que as amostras feitas a temperatura de 60°C que por sua vez apresentava coloração mais escura que a amostra produzida a temperatura de 40°C.

É possível notar tanto na Fig. (14), relacionando os dois gráficos, que a amostra que possui água tende a deformar-se mais com menor quantidade de força, visualiza-se na Fig (14b), que a força necessária para deformar metade da espessura da amostra foi de 600 N. Já para amostras em que houve a variação de temperatura sem adição de água Fig.(13) a força necessária para deformar 50% da amostra foi de 1000N.

Logo se o desejado do elastômero natural for uma maior rigidez, o parâmetro que pode proporcionar esse aspecto é a temperatura. Se o que se deseja do material for uma deformação com aplicação de força menor, a adição de água no processo de vulcanização é uma solução.

#### 4.4 MODELAGEM *BOND GRAPH*

Conforme exposto na metodologia proposta, seção (3.5.1), antes de compararmos o resultado simulado com o resultado experimental é necessário garantirmos se o modelo proposto é estável. Dentre as formas de análise de estabilidade do sistema, foi escolhida a localização dos pólos no plano  $s$  e a resposta no tempo a uma excitação do tipo impulso.

A Tab. (5) apresenta os pólos referentes elastômeros sintéticos e naturais em estudo.

Tabela 5 – Valores simulados em MatLab dos pólos para cada elastômero em análise.

Elastômero	Pólos	Dureza Shore-A
Azul	$-38,1 \pm 2759,8i$	13,73
Branco	$-28,5 \pm 2387,9i$	11,00
Platina	$-20,5 \pm 2024,7i$	9,03
Látex $80^{\circ}C - 0\%$	$-121,3 \pm 4923,2i$	27,78
Látex $80^{\circ}C - 20\%$	$-90,5 \pm 4256,3i$	25,06
Látex $80^{\circ}C - 40\%$	$-86,8 \pm 4164,5i$	21,64

Os resultados apresentados na Tab. (5) evidenciam que quanto maior for a dureza do elastômero a localização dos pólos estará mais à esquerda do plano complexo  $s$ . Esse comportamento se deve ao fato de que os valores de  $k$  na Eq. (13) dependem da resposta da força no teste dinâmico de compressão e os valores de  $b$  adotados na simulação correspondem a aproximadamente 1% de  $k$ .

A Fig. (15) demonstra de maneira gráfica a localização dos pólos para os elastômeros sintéticos, conforme já exposto os resultados evidenciam a estabilidade geral dos sistemas analisados. Outra forma de analisarmos a estabilidade é verificarmos a convergência quando aplicamos uma entrada do tipo impulso, tal resposta também é demonstrada na Fig. (15). Conclui-se portanto que a modelagem matemática para os elastômeros sintéticos podem ser comparadas com os resultados experimentais.

Análogo a análise feita para os elastômeros sintéticos a análise de estabilidade do elastômeros naturais podem ser em termo da posição dos pólos função de transferência em malha fechada conforme pode ser observados na Fig. (16), tem-se os valores de pólos e a resposta ao impulso que é limitado para uma entrada finita.

Feito a análise de estabilidade para os objetos de estudo deste trabalho, pode-se comparar a resposta experimental com a modelagem matemática

Na Fig. (17) temos os resultados comparativos entre a modelagem matemática e os dados experimentais para os elastômeros sintéticos referentes a deformação permanente a compressão, pode-se notar que o valor de deformação permanente obtido da simulados no modelo matemático empregado estão em torno do valor médio experimental de cada amostra, isso é devido a resposta do sistema e das trocas de energias que são feitas.



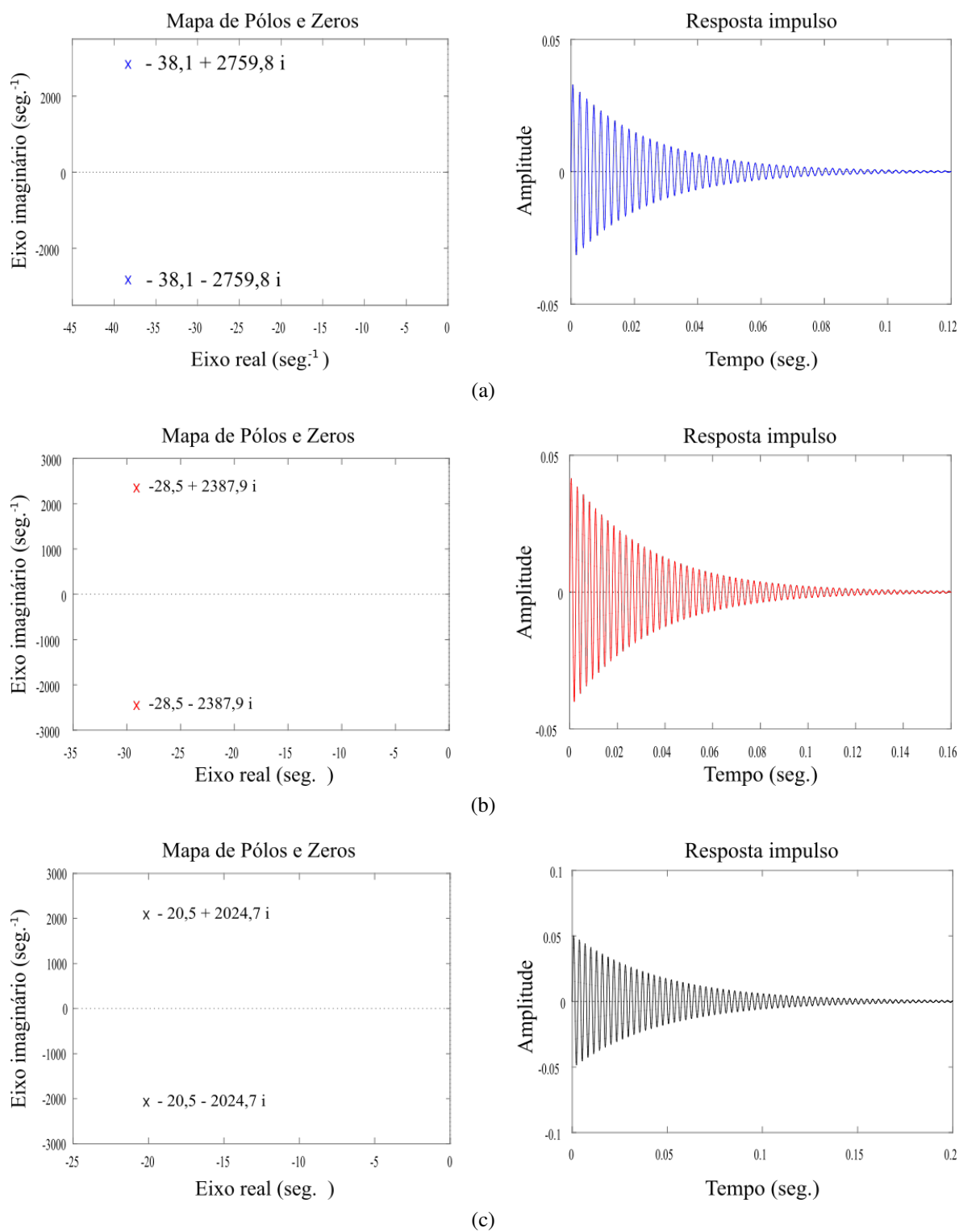


Figura 15 – **Análise de estabilidade.** Elastômeros sintéticos do tipo Azul, Branco e Platina

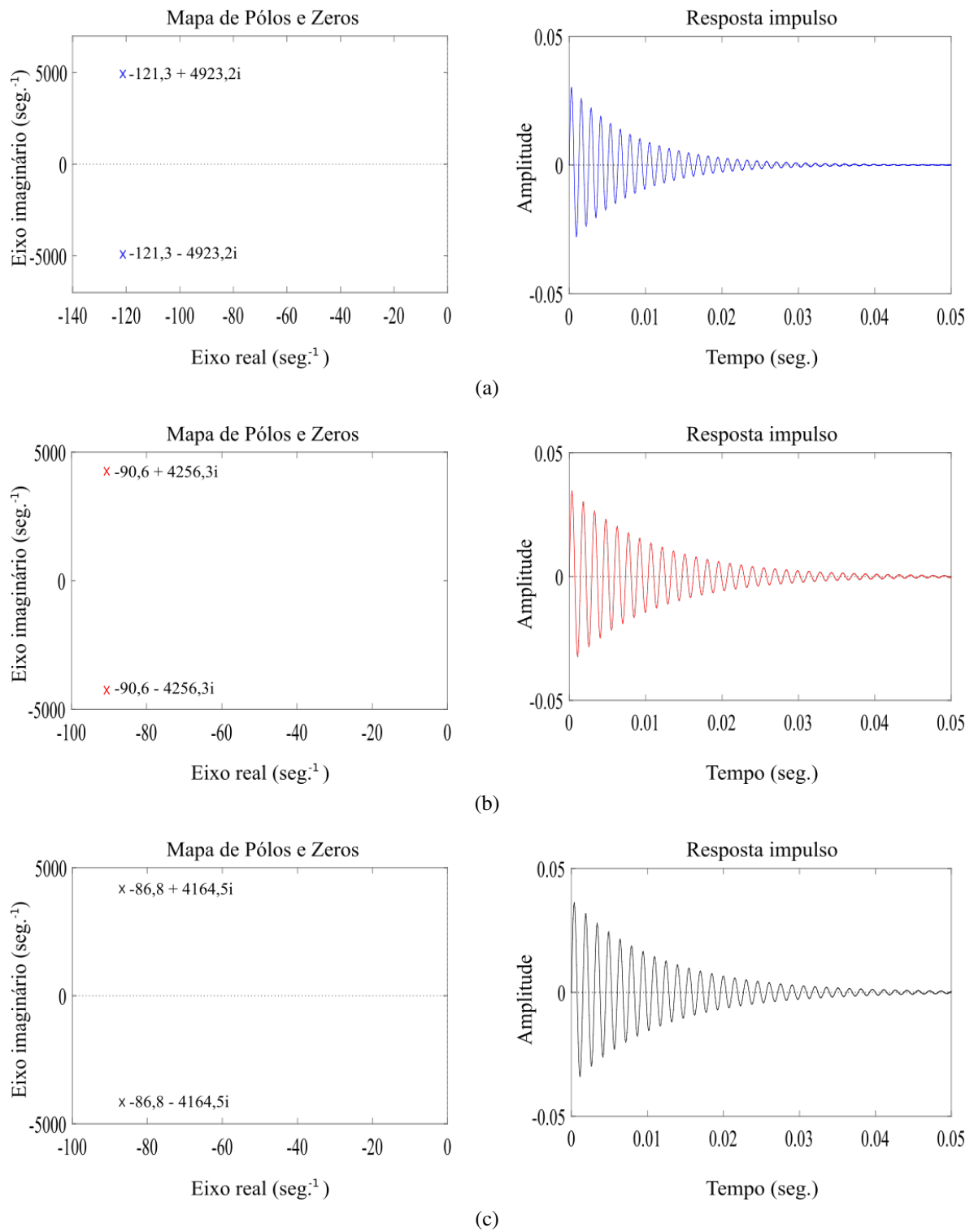


Figura 16 – **Análise de estabilidade para os elastômeros naturais.** Látex com diferentes condições de vulcanização.

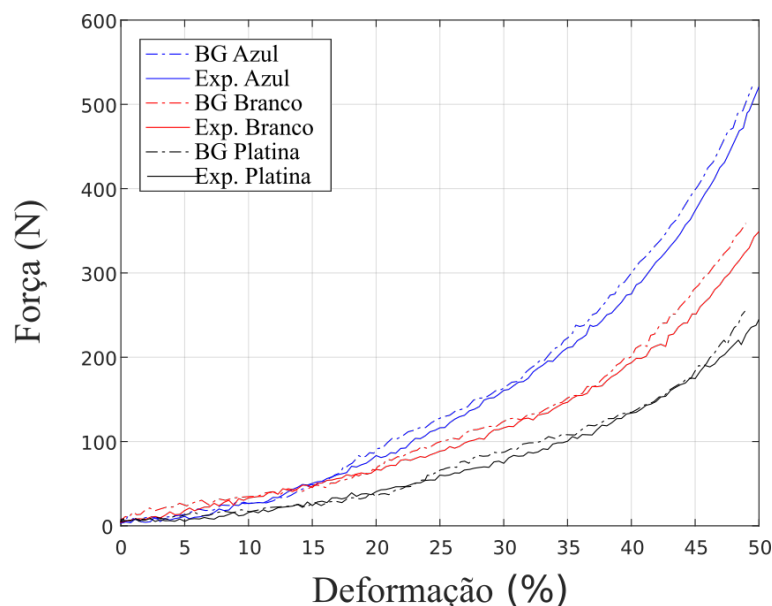


Figura 17 – **Deformação dinâmica a compressão**. Resultados comparativos entre a modelagem matemática e os dados experimentais para os elastômeros sintéticos.

Nota-se ainda da Fig. (17) que a amostra do elastômero platina possui os valores experimentais e da modelagem próximos, chegando a igualar-se para a deformação de (40a45)%. As amostra dos elastômeros azul e branco nota-se que a deformação experimental e simulado pela modelagem matemática tende a se afastar e força acima de 200 N e acima de 40% e força de 200 N, respectivamente.

Na Fig. (18) tem-se a comparação das deformações numéricas e experimentais devido ao ensaio dinâmico de compressão em elastômeros sintéticos, valores obtidos na modelagem matemática possuem comportamento senoidal em torno do valor médio experimental, ainda é possível notar que há uma diferença de amplitude dos valores da modelagem matemática em torno dos valores médios obtidos experimentalmente, sendo bem próximos entre si.

Percebe-se da Fig.(18) que os valores obtidos do modelo matemático BG estão entorno dos valores médios experimentais obtidos. O valor médio experimental obtido nesse teste refere-se a entrada de espessura máxima das amostras de 13mm, tanto o elastômero sintético como o elastômero natural foram fabricados com essa dimensão. Como a deformação feita nas amostras foi de 50% de sua espessura máxima, ou seja, 6,5mm tem-se curvas sobrepostas, por isso o gráfico apresenta apenas um valor médio experimental. E ainda foi feita a análise deformação experimental versus deformação matemática para ter uma previsibilidade do comportamento do material.

Os resultados da Fig. (19) tem-se os resultados comparativos entre a modelagem matemática e os dados experimentais do látex com a adição de água, quando submetidos a deformação permanente a compressão dos elastômeros naturais com diferentes condições de vulcanização. Nota-se o comportamento dos elastômeros naturais comportamento senoidal em torno dos valores médios.

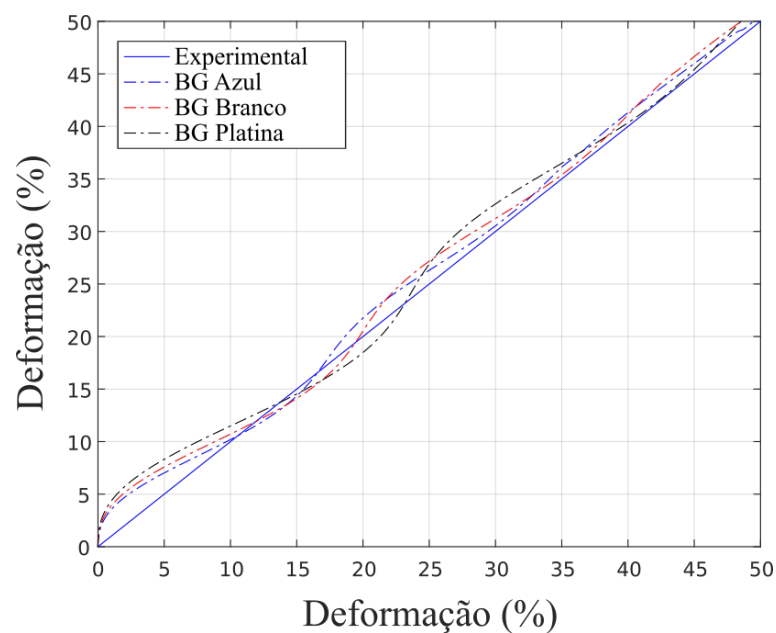


Figura 18 – **Deformação numérica vs deformação experimental.** Comparação das deformações numéricas e experimentais devido ao ensaio dinâmico de compressão em elastômeros sintéticos.

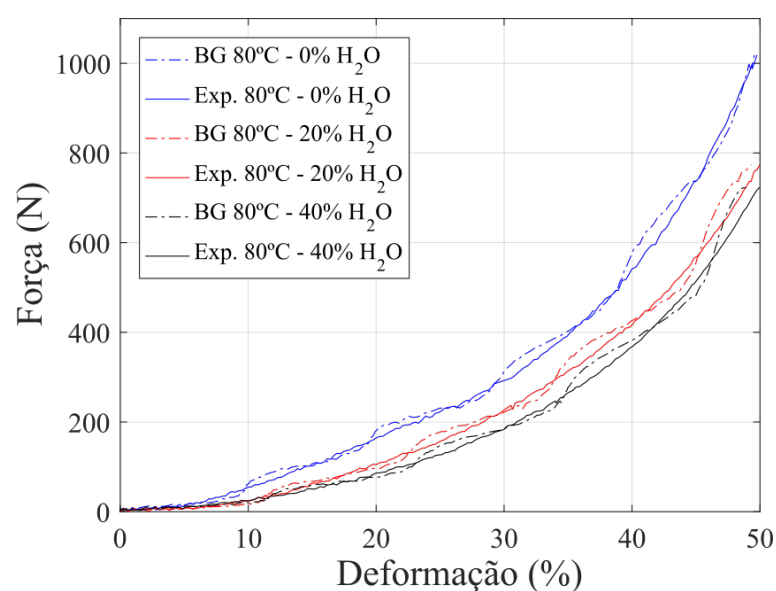


Figura 19 – **Deformação dinâmica a compressão dos elastômeros naturais.** Resultados comparativos entre a modelagem matemática e os dados experimentais do látex com diferentes condições de vulcanização.

Percebe-se na Fig. (19) que os elastômeros naturais com maior porcentagem de água, apresentam o comportamento de variação de amplitude em torno no valor médio experimental.

Nos resultados da Fig. (20) tem-se o comparação das deformações numéricas e experimentais devido ao ensaio dinâmico de compressão do látex com diferentes condições de vulcanização, feita uma comparação deformação numérica vs deformação experimental dos elastômeros naturais, pois como a entrada do sistema é aplicação de força em ambos os casos e a saída é uma deformação que amostra sofreu, logo a comparação entre o experimental e numérico se torna válido para análise.

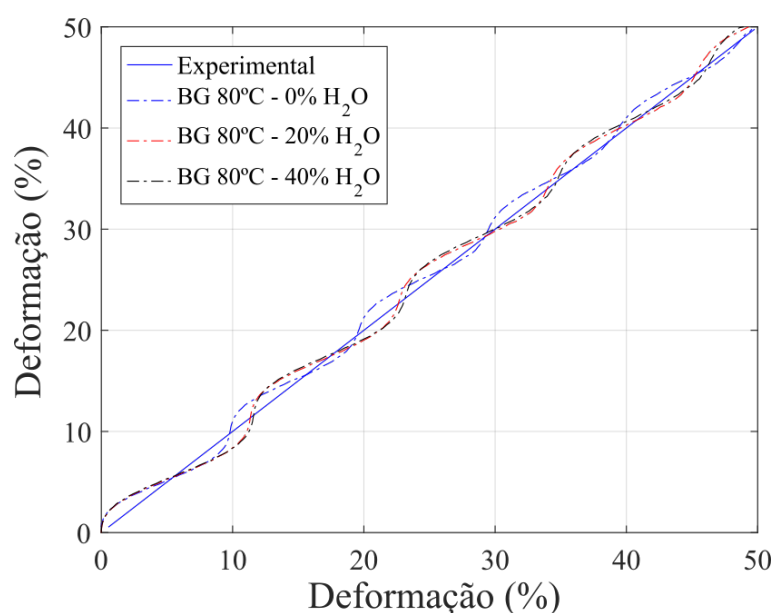


Figura 20 – **Deformação dinâmica numérica vs deformação experimental dos elastômeros naturais.** Comparação das deformações numéricas e experimentais devido ao ensaio dinâmico de compressão do látex com diferentes condições de vulcanização.

Percebe-se na Fig. (20) que os valores da modelagem matemática análogo ao comportamento dos elastômeros sintéticos possuem o comportamento senoidal em torno do valor médio experimental obtido. O comportamento senoidal implica que a modelagem matemática converge para os valores experimentais obtidos.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados preliminares obtidos, é possível pontuar os principais pontos deste estudo, conforme listadas a seguir:

1. A implementação dos métodos de moldagem dos elastômeros sintéticos e o desenvolvimento da moldagem dos elastômeros naturais se mostrou eficaz na moldagem das amostras que foram testadas, gerando um procedimento experimental que pode ser replicado para eventuais aprofundamento para esse tipo de teste.
2. A realização do teste de dureza *Shore A* mostrou-se satisfatória, pois os valores medidos estão na faixa de valores de (7,5 – 15) de dureza, o que condiz com as informados fornecidas pelo fabricante dos elastômeros sintéticos validando o método, já para os elastômeros naturais não se tinha referencia de valores, os valores de dureza dos elastômeros naturais medidos estão na faixa de 21 a 28,5 de dureza *Shore A*, produzidos com temperaturas variáveis. Para as amostras que foram produzidas a mesma temperatura de 80°C e feita adição de água o valor de dureza estão na faixa de (19,5 – 29), podendo inferir que os elastômeros sintéticos possuem menor grau de dureza *shoreA* em relação aos elastômeros naturais.
3. No teste de deformação permanente à compressão o que pode se inferir do elastômeros sintéticos que a amostra platina testada apresentou nos teste maior absorção de energia, ou seja, e amostrar que apresentou menor deformação, já para as amostras azul e branco não se pode definir qual sofreu mais deformação plástica, pois os valores de desvios do elastômero branco está dentro da faixa de valores do elastômeros azul, estão na faixa de (4,5% – 16,5%) de deformação permanente à compressão. Para os elastômeros naturais notou-se uma relação de linearidade com aumento da temperatura e sua deformação medida estão na faixa de (11,5% – 24,5%), o que se pode concluir que as amostras de látex quando fabricado a temperatura maior, tende a ter menor deformação. Quando adição de água na amostra de látex e fixando-se a temperatura a amostra tende a ter maior deformação.
4. No teste de dinâmica de compressão o comportamento dos elastômeros sintéticos e naturais são semelhantes, tendo uma tendência a forma uma curva quadrática, sendo importante a análise de estabilidade do sistema para continuação da análise. Pela análise de estabilidade verifica-se que os elastômeros naturais são mais estáveis, no eixo real estão na faixa de (-86,8 a -121,3), que as amostras de elastômeros sintéticos, na faixa de valores de (-20,5 a -38,1). Logo, os elastômeros naturais é uma opção mais viável para desenvolver aplicações na área industrial e biomédica, pois pode ser desenvolvidos estudos para

adição de outros componentes químicos e físicos para melhoria de suas propriedades, além do fator econômico e do benefício de ser um material biocompatível.

5. O uso da técnica de modelagem *Bond Graph* se mostrou eficaz na modelagem no sistema, pois os valores encontrados na modelagem estão em torno dos valores experimentais encontrados para caracterização compressiva das amostras de elastômeros sintéticos e naturais testados. O método *Bond Graph* se mostrou estável e convergente, esse modelo foi adotado para determinar o comportamento próximo ao real do elastômeros.

O estudo da caracterização compressiva das borracha sintética e natural são dados gerados para contribuir em estudos para simular possíveis aplicações que podem ser feitas com a utilização dessas matérias, podendo trazer previsibilidade, não sendo necessário em alguns casos a construção de um modelo físico para testar cada hipótese levantada pelo pesquisador. Logo a aplicabilidade e usabilidade desses materiais é facultado e avaliado ao projetista e pesquisador, dependendo do que se deseja do produto final, portanto não foi avaliado qual é o melhor dentre os materiais de elastômeros testados.

A caracterização dos elastômeros sintéticos e naturais é relevante para áreas acadêmica e científica, pois é necessário o desenvolvimento e o conhecimento de novos materiais que auxiliem na caracterização desses materiais pois não há informações de fabricantes quanto aos seus aspectos mecânicos.

Para trabalhos futuros sugere-se a realização de mais métodos de fabricação no processo de vulcanização do látex para equiparação dos dois tipos de elastômeros. A realização de mais testes que caracterizem a borracha, como testes cíclicos, abrasão dentre outros, que podem conferir robustez de dados para melhor previsibilidade e confiabilidade para eventuais estudos que se possa aplicar esses materiais em equipamentos industriais em especial na área de equipamentos biomédicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, L. *Introdução à Identificação de Sistemas – Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*. Brasil: Editora UFMG, 2007. v. 3. ISBN 9788570415844.

ALTOÉ, M. L.; ROSA, S. S. R. F. Bond Graph modeling of the human esophagus and analysis considering the interference in the fullness of an individual by reducing mechanical esophageal flow. *Brazilian Journal of Biomedical Engineering*, v. 29, n. 3, p. 286–297, 2013.

ASHRAFIZADEH, H.; MERTINY, P.; MCDONALD, A. Evaluation of the effect of temperature on mechanical properties and wear resistance of polyurethane elastomers. *Wear*, v. 368–369, p. 26 – 38, 2016. ISSN 0043-1648. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164816301831>.

ASTM. *Standard Test Methods for Rubber Properties in Compression*. EUA, 2012.

ASTM. Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness. American Society for Testing and Materials, EUA, 2015.

ASTM. *Standard Test Methods for Rubber Property - Compression Set*. EUA, 2016.

BRASIL, R. M. L. R. d. F.; BALTHAZAR, J. M.; GÓIS, W. *Métodos Numéricos e Computacionais na Prática de Engenharias e Ciências*. São Paulo: Blücher, 2015. ISBN 978-85-212-0934-8.

CAETANO, M. *Norma Técnica*. 2010–2014.

CAL, B. et al. Vulcanized elastomers assessment [evaluación de elastómeros vulcanizados]. *Afinidad*, v. 69, n. 558, p. 131–136, 2012. Cited By 1. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84871421006&partnerID=40&md5=293d30d4c78f2c8d6035e8cf6c954a54>.

CANEVAROLO, S. V. *Ciência dos Polímeros*. [S.l.]: Artliber Editora Ltda, 2006. ISBN 02-0725-620-192.

CHANDRA, C. J.; BIPINBAL, P.; SUNIL, K. N. Viscoelastic behaviour of silica filled natural rubber composites – correlation of shear with elongational testing. *Polymer Testing*, v. 60, p. 187 – 197, 2017. ISSN 0142-9418.

CHEN, C. et al. Effects of rubber-based agroforestry systems on soil aggregation and associated soil organic carbon: Implications for land use. *Geoderma*, v. 299, p. 13 – 24, 2017. ISSN 0016-7061.

COSSA, M.; SIRQUEIRA, A.; SOARES, B. Development of thermoplastic elastomers vulcanized (tpv) with polypropylene waste tire. i - factorial design experiments [desenvolvimento de elastômeros termoplásticos vulcanizados (tpv) a base de polipropileno com resíduo de pneu. i - planejamento fatorial de experimentos]. *Polimeros*, v. 19, n. 3, p. 190–195, 2009. Cited By 5. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-73949153168&partnerID=40&md5=9921a48cd5e673a755014547e5db4541>.



COSTA, D. de O. *Sistema de apoio ao diagnóstico de nódulos cancerígenos esofágicos subcutâneos com uso de análise térmica*. Trabalho de Conclusão de Curso, 2015.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Sistemas de Controle Modernos*. [S.l.]: Gen— LTC, 2009. ISBN 978-85-216-1714-3.

FERNANDES, R. d. A. Modelagem bond graph e o estudo de caso de um motor de corrente contínua. 2011.

FORMELA, K. et al. Assessment of microstructure, physical and thermal properties of bitumen modified with ldpe/gtr/elastomer ternary blends. *Construction and Building Materials*, v. 106, p. 160–167, 2016. Cited By 4.

GOMES, A. et al. Creep behavior of polyamide 6/nitrylic rubber tpv's blends [comportamento sob fluência em elastômeros termoplásticos vulcanizados baseados em poliamida 6 e borracha nitrílica]. *Polimeros*, v. 19, n. 3, p. 196–201, 2009. Cited By 4.

HUNUPOLAGAMA, D. M. et al. Unveiling members of colletotrichum acutatum species complex causing colletotrichum leaf disease of hevea brasiliensis in sri lanka. *Current Microbiology*, v. 74, n. 6, p. 747–756, 2017. ISSN 1432-0991.

JHA, M.; CHATTI, N.; DECLERCK, P. Robust fault detection in bond graph framework using interval analysis and fourier-motzkin elimination technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 93, p. 494–514, 2017. Cited By 0. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85015333865&doi=10.1016%2fj.ymssp.2017.02.022&partnerID=40&md5=0b5ae5f842f520b7e20df11f1bf08b6f>.

JUNG, H. S. et al. Magnetic carbonyl iron/natural rubber composite elastomer and its magnetorheology. *Composite Structures*, v. 136, p. 106 – 112, 2016. ISSN 0263-8223.

KARNOPP, D. C.; MARGOLIS, D.; ROSENBERG, R. *System Dynamics: Modeling and Simulation of Mechatronic Systems*. New York: Wiley, 2000. (A Wiley-Interscience publication). ISBN 9780471333012.

LEE, E.-J. et al. Poly(urethane acrylate)-based gel polymer films for mechanically stable, transparent, and highly conductive polymer electrolyte applications. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 134, n. 26, p. n/a–n/a, 2017. ISSN 1097-4628. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/app.45009>.

LIMA, P.; OLIVEIRA, J.; COSTA, V. Crystallization kinetics of thermoplastic elastomeric blends based on ground tyre rubber. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 132, n. 40, 2015. Cited By 1.

LIMA, P. et al. Rheological properties of ground tyre rubber based thermoplastic elastomeric blends. *Polymer Testing*, v. 45, p. 58–67, 2015. Cited By 2. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84930958966&doi=10.1016%2fj.polymer.2015.05.006&partnerID=40&md5=883d56d6f3aac47a6ec9c4f7421b5814>.

LIYANAGE, K. et al. Taxonomic revision and phylogenetic analyses of rubber powdery mildew fungi. *Microbial Pathogenesis*, v. 105, p. 185 – 195, 2017. ISSN 0882-4010. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0882401016308324>.

MANO, E. B. *Polímeros como materiais de engenharia*. [S.l.]: Editora BLUCHER, 2007. ISBN 85-212-0060-9.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. *Introdução a Polímeros - 2ª edição*. 1999.

OLIVEIRA, D. S. *DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO PÉ PROTÉTICO OLIVEIRA FOOT*. 72 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Distrito Federal - Brasil, 2016.

OLIVEIRA, J. H. de. *PROPOSTA DE AMORTECIMENTO ADAPTÁVEL PARA MULETA CANADENSE*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de Brasília, Junho 2017.

PALMA, C. et al. Elastomer modified asphalt and its use in paving [modificación de asfalto con elastómeros para su uso en pavimentos]. *Afinidad*, v. 73, n. 574, p. 119–124, 2016. Cited By 0. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84986573098&partnerID=40&md5=9afb83e8c63166d2d7420abe00651e>.

PETERS, D. L. *Modeling of Dynamic Systems: Notes on Bond Graph*. EUA: Spring, 2015. v. 1.

PEYDRÓ-RASERO, M. et al. Thermoplastic elastomer addition for recovering recycled plastics. mechanical and thermal characterization [recuperación de plásticos reciclados mediante adicción de elastómeros termoplásticos. caracterización mecánica y térmica]. *Dyna (Spain)*, v. 87, n. 5, p. 526–532, 2012. Cited By 1. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84867093036&doi=10.6036%2f4674&partnerID=40&md5=60f3a17861e7f31a5bb36604c4e521ba>.

PUSZKA, A.; KULTYS, A. New thermoplastic polyurethane elastomers based on aliphatic diisocyanate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 128, n. 1, p. 407–416, 2017. ISSN 1588-2926.

R., M. et al. Utility of single nucleotide polymorphism markers in clonal profiling of hevea brasiliensis. *Acta Horti*, p. 429–436, 2017.

REYES, R.; RIDEOUT, G.; BUTT, S. Dynamic analysis of a deep water marine riser using bond graphs. In: . [S.l.: s.n.], 2016. v. 48, n. 10, p. 204–211. Cited By 0.

RIBEIRO, J. A.; ROSA, S. S. R. F. Characterization of natural latex membranes: A proposal for amblyopia treatment. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 14, n. 8, p. 3534–3539, 2016.

ROGULSKA, M.; KULTYS, A.; PIKUS, S. The effect of chain extender structure on the properties of new thermoplastic poly(carbonate–urethane)s derived from mdi. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 127, n. 3, p. 2325–2339, 2017. ISSN 1588-2926. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-016-5756-4>.

ROSA, S. de S. R. F. *Desenvolvimento de um sistema de controle de fluxo esofágico para o tratamento da obesidade*. 121 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília faculdade de tecnologia departamento de engenharia elétrica, Distrito Federal - Brasil, 2009.

ROSA, S. S. R. F. et al. Modeling of the human tibia bone using Bond Graph. *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, v. 29, n. 4, p. 329–342, Jan 2014.

ROY, C. B. et al. A climatic risk analysis of the threat posed by the south american leaf blight (salb) pathogen microcyclus ulei to major rubber producing countries. *European Journal of Plant Pathology*, v. 148, n. 1, p. 129–138, 2017. ISSN 1573-8469. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10658-016-1076-6>.

S., M. et al. Master curves for the sulphur assisted crosslinking reaction of natural rubber in the presence of nano- and nano-structured sp<sup>2</sup> carbon allotropes. *eXPRESS Polymer Letters*, v. 11, n. 6, p. 435–448, 2017.

SANTEULARIA, T. et al. Peripheral blockade with elastomeric pumps. our experience [elastómeros en bloqueos periféricos. nuestra experiencia]. *Revista Espanola de Anestesiologia y Reanimacion*, v. 63, n. 9, p. 549–550, 2016. Cited By 0. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84977518448&doi=10.1016%2fj.redar.2016.05.004&partnerID=40&md5=6aa9a7d086a8ac2ca28f7fa17d589634>.

SILVA, J. C. D.; FONSECA, G. G. D.; ANDRADE, M. D. Mechanical tests in thermoplastic elastomers used in 3d printers for the construction of hand prosthesis [ensaios mecânicos em elastômeros termoplásticos utilizados em impressoras 3d para a construção de próteses de mão]. In: . [s.n.], 2014. Cited By 0. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84904968124&doi=10.1109%2fPAHCE.2014.6849617&partnerID=40&md5=0409c6a5b7b5c9a37db2673f29b9bfab>.

W., P. et al. De novo hybrid assembly of the rubber tree genome reveals evidence of paleotetraploidy in hevea species. *Scientific Reports*, v. 7, 2017.

WANG, Z. et al. Thermoplastic elastomer based on high impact polystyrene/ethylene-vinyl acetate copolymer/waste ground rubber tire powder composites compatibilized by styrene-butadiene-styrene block copolymer. *Materials Chemistry and Physics*, v. 136, n. 2-3, p. 1124–1129, 2012. Cited By 6.

XIMENES, M.; PERON, G. *Implementação e avaliação de uma palmilha de látex com sistema de sensores para investigação da distribuição de pressão plantar em indivíduos autistas*. Trabalho de Conclusão de Curso, 2013.

ZACHARIAH, A. K. et al. Experiments and modeling of non-linear viscoelastic responses in natural rubber and chlorobutyl rubber nanocomposites. *Applied Clay Science*, v. 123, p. 1 – 10, 2016. ISSN 0169-1317.

ZAIMOVA, D.; BAYRAKTAR, E.; MISKIOGLU, I. Design and manufacturing of new elastomeric composites: Mechanical properties, chemical and physical analysis. *Composites Part B: Engineering*, v. 105, p. 203 – 210, 2016. ISSN 1359-8368.

4

3

2

1

4

3

2

1

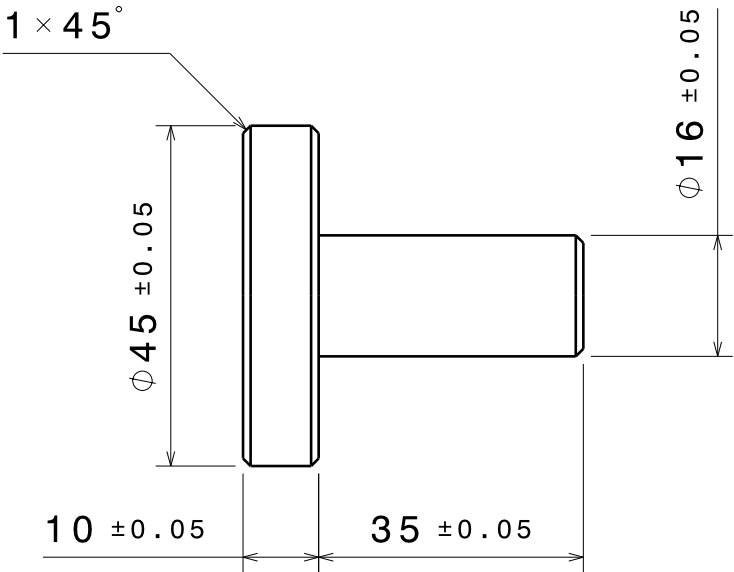
D

C

B

A

APÊNDICE A – DISPOSITIVO DE COMPRESSÃO DINÂMICA



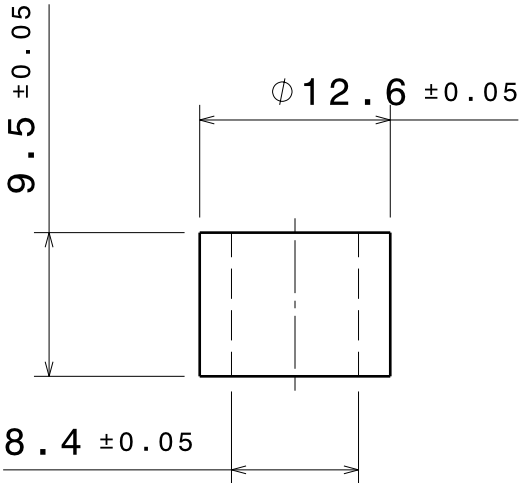
DATA 01/05/2017		Cilindro de Dois Diâmetros	
MATERIAL Aço 1045		PROJETADO Ludmila E. dos Santos	
TAMANHO A4		Revisado: Danilo dos Santos Oliveira	
ESCALA 1:1	Quantidade 2 Unidades		1 / 1

D

A

## APÊNDICE B – DISPOSITIVOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

B.1 ESPAÇADOR CILÍNDRICO



DATE: 01/05/2017		Espaçador	
MATERIAL: Aço SAE 1045		Projetado: Ludmila E. dos Santos	
SIZE A4		REVISADO: Danilo S. Oliveira	
SCALE 2:1		QUANTIDADE: 4 Unidades	SHEET 1 / 1

4

3

2

1

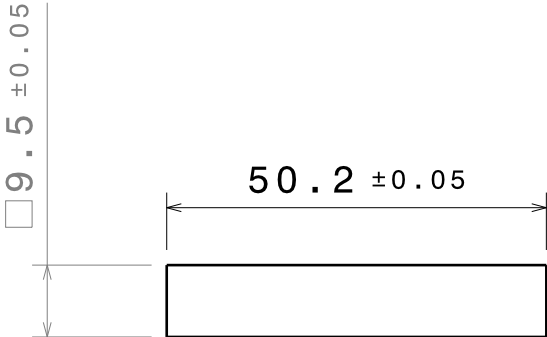
4

3

2

1

B.2    ESPAÇADOR PRISMÁTICO A



Data: 01/05/2017		Espaçador Prismático	
MATERIAL: AÇO 1045		PROJETADO: Ludmila E. dos Santos	
SIZE A4		REVISADO: Danilo S. Oliveira	
SCALE 1:1	QUANTIDADE: 2 UNIDADES		SHEET 1 / 1

D

C

B

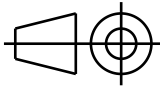
A

52

B.3 ESPAÇADOR PRISMÁTICO B

9 . 5 ± 0 . 05

126 . 3 ± 0 . 05



DATE:  
01/05/2017

Espaçador Prismático B

MATERIAL  
AÇO SAE 1045

PROJETADO:  
Ludmila E. dos Santos

TAMANHO  
A4

REVISADO:  
Danilo S. Oliveira

SCALE  
1 : 1

QUANTIDADE:  
1 Unidade

1 / 1

D

A



D

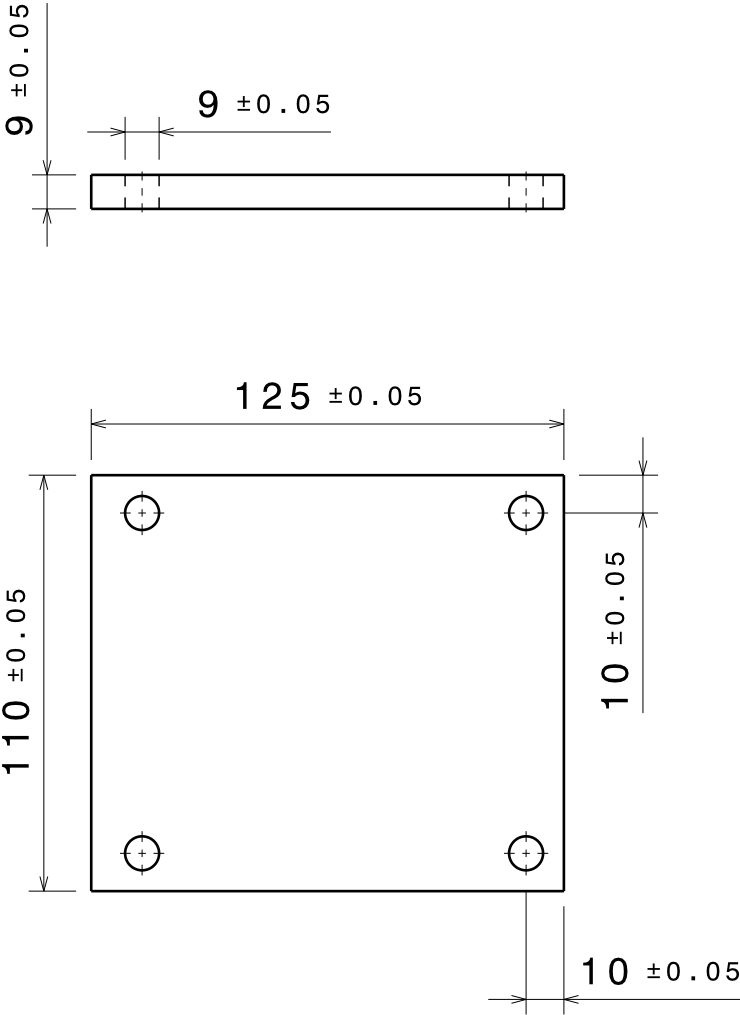
C

B

A

53

B.4 PLACA DE COMPRESSÃO



DATA: 01/05/2017

PLACA

MATERIAL:  
AÇO SAE 1045

Projetado  
Ludmila E. dos Santos

TAMANHO  
A4

REVISADO:  
Danilo S. Oliveira

SCALE  
1:2

QUANTIDADE  
2 Unidades

1/1

D

A

## APÊNDICE C – DISPOSITIVOS DE MOLDAGEM

4

3

2

1

D

C

B

A

55

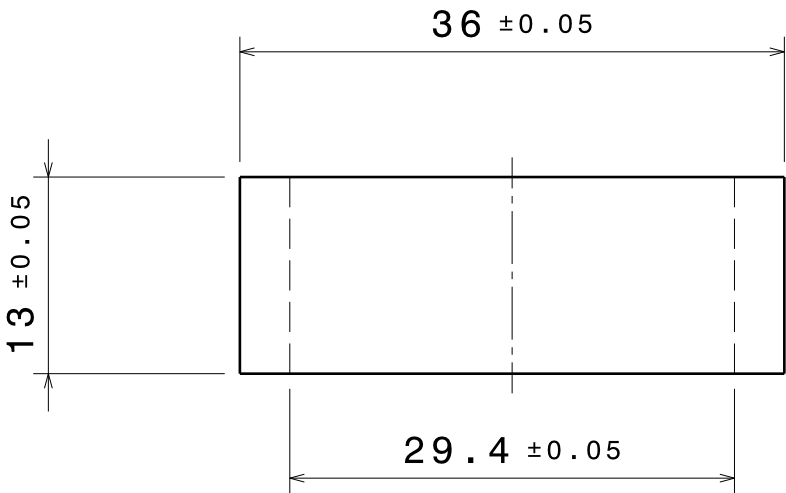
C.1 MOLDE EM POLIÓXIDO DE METILENO

4

3

2

1



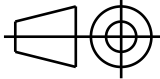
DATE:  
01/05/2017

CILINDRO VAZADO

MATERIAL:  
Polióxido de Metileno

PROJETADO:  
Ludmila E. dos Santos

SIZE  
A4



REVISADO:  
Danilo S. Oliveira

ESCALA:  
2:1

QUANTIDADE:  
4 Unidades

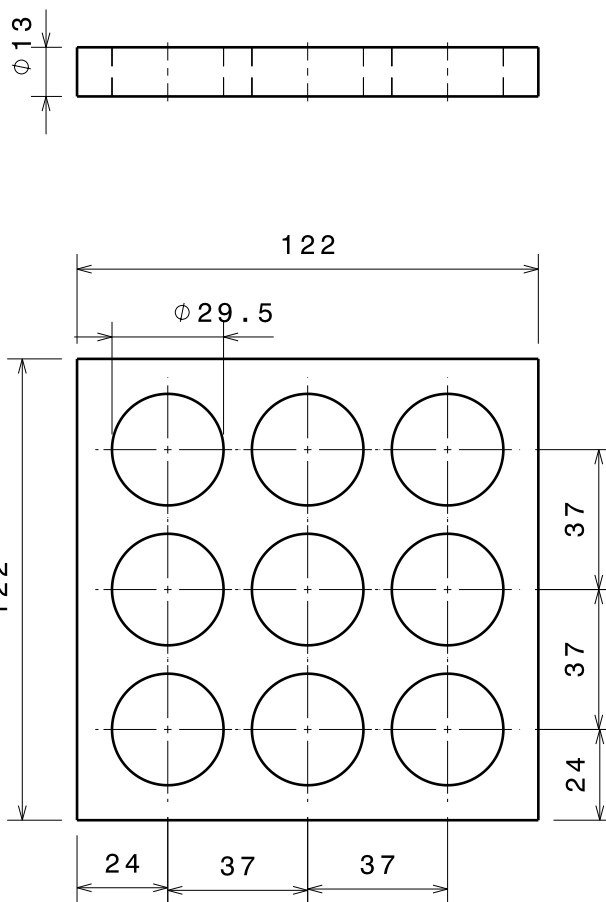
1/1

D

A

## C.2 MOLDE EM ALUMÍNIO

56



TOLERÂNCIAS:

$\pm 0.05$

DATA:

11/05/2017

Placa de modelagem - LÁTEX

MATERIAL:

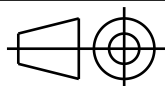
Aço 1045

PROJETADO:

Ludmila E. dos Santos

TAMANHO:

A4



REVISADO:

Danilo S. Oliveira

ESCALA:

1:2

QUANTIDADE:

1 Unidade

1/1

## APÊNDICE D – CÓDIGO MATLAB

### D.1 MODELAGEM MATEMÁTICA PARA ELASTÔMEROS SINTÉTICOS

```

1 %% -----
2 % Descrição: Programa de modelagem BG massa-mola-amortecedor
3 % Autor: Ludmila Evangelista dos Santos
4 % Data: 20 de maio de 2017
5 %% ----- Limpeza de Dados -----
6 close all
7 clear all
8 clc
9 %% ----- Leitura dos dados Experimentais -----
10 Ma = xlsread('dadosE.xls','Plan1','A1:A134'); % Deflexão (mm) – Azul
11 Mb = xlsread('dadosE.xls','Plan1','D1:D134'); % Deflexão (mm) – Branco
12 Mp = xlsread('dadosE.xls','Plan1','G1:G134'); % Deflexão (mm) – Platina
13
14 Na = xlsread('dadosE.xls','Plan1','B1:B134'); % Força (N) – Azul
15 Nb = xlsread('dadosE.xls','Plan1','E1:E134'); % Força (N) – Branco
16 Np = xlsread('dadosE.xls','Plan1','H1:H134'); % Força (N) – Platina
17
18 Fa = xlsread('dadosE.xls','Plan1','B134'); % Força máxima Azul
19 Fb = xlsread('dadosE.xls','Plan1','E134'); % Força máxima Branco
20 Fp = xlsread('dadosE.xls','Plan1','H134'); % Força máxima Platina
21
22 La = xlsread('dadosE.xls','Plan1','A134'); % Desloc-máx (mm) – Azul
23 Lb = xlsread('dadosE.xls','Plan1','D134'); % Desloc-máx (mm) – Branco
24 Lp = xlsread('dadosE.xls','Plan1','G134'); % Desloc-máx (mm) – Platina
25
26 %% ----- Variáveis -----
27 ma=(10.52/1000); % massa da elastomero Azul [kg]
28 ka=Fa/(La/1000); % Amortecimento elastico [N/m]
29 ba=ka*1e-5; % Coeficiente de amortecimento [N.s/m]
30
31 mb=(9.61/1000); % massa da elastomero Azul [kg]
32 kb=Fb/(Lb/1000); % Amortecimento elastico [N/m]
33 bb=kb*1e-5; % Coeficiente de amortecimento [N.s/m]
34
35 mp=(9.46/1000); % massa da elastomero Azul [kg]
36 kp=Fp/(Lp/1000); % Amortecimento elastico [N/m]
37 bp=kp*1e-5; % Coeficiente de amortecimento [N.s/m]
38
39 Q=linspace(0,0.0067,134); % 137 é o números de linhas do arquivo excel
40
41 %% ----- Solução x'=Ax+Bu Y=Cx+Du -----
42 Aa = [0 1/ma;-ka -ba/ma]; % BG Azul
43 Ab = [0 1/mb;-kb -bb/mb]; % BG Branco
44 Ap = [0 1/mp;-kp -bp/mp]; % BG Platina
45
46 B = [0; 1]; % BG
47 C = [1 0]; % BG (Interesse no vetor x1)
48 D = 0;
49
50 sysa = ss(Aa,B,C,D); % Espaços de estados BG Azul
51 sysb = ss(Ab,B,C,D); % Espaços de estados BG Branco

```

```

52 sysp = ss(Ap,B,C,D); % Espaços de estados BG Platina
53
54 ua=ka*Q; % Função pra k linear (Azul)
55 ub=kb*Q; % Função pra k linear (Branco)
56 up=kp*Q; % Função pra k linear (Platina)
57
58 [Xa,Ua,Wa] = lsim(sysa,ua,Q); % Solução Elatômero Azul
59 [Xb,Ub,Wb] = lsim(sysb,ub,Q); % Solução Elatômero Branco
60 [Xp,Up,Wp] = lsim(sysp,up,Q); % Solução Elatômero Platina
61
62 Ea =(Xa./13).*100; %Tranforma o deslocamento Xa em deformação
63 Eb =(Xb./13).*100; %Tranforma o deslocamento Xb em deformação
64 Ep =(Xp./13).*100; %Tranforma o deslocamento Xp em deformação
65
66 Lma =(Ma./13).*100; %Tranforma o deslocamento Ma em deformação
67 Lmb =(Mb./13).*100; %Tranforma o deslocamento Mb em deformação
68 Lmp =(Mp./13).*100; %Tranforma o deslocamento Mp em deformação
69
70 %% ----- Visualização de Dados -----
71 figure
72 plot(Ea*1000,Na,'blue-.',Lma,Na,'blue-',...
73 Eb*1000,Nb,'r-.',Lmb,Nb,'r-',...
74 Ep*1000,Np,'black-.',Lmp,Np,'black-') % Valores equivalentes à mm
75 axis([0,50,0,600]) % Limites dos eixos
76 xlabel('Deformação (%)'); % Rótulo do eixo "X"
77 ylabel('Força (N)'); % Rótulo do eixo "Y"
78 legend('BG Azul','Exp. Azul',...
79 'BG Branco','Exp. Branco',...
80 'BG Platina','Exp. Platina',...
81 'Location','northwest');
82 grid
83
84 figure
85 plot(Lma,Lma,'blue-',...
86 Ea*1000,Lma,'blue-',...
87 Eb*1000,Lmb,'r-.',...
88 Ep*1000,Lmp,'black-') % Valores equivalentes à mm
89 axis([0,50,0,50]) % Limites dos eixos
90 xlabel('Deformação (%)'); % Rótulo do eixo "X"
91 ylabel('Deformação (%)'); % Rótulo do eixo "Y"
92 legend('Experimental','BG Azul',...
93 'BG Branco','BG Platina',...
94 'Location','northwest');
95 grid
96 %% ----- Análise de Estabilidade -----
97 figure
98 subplot(2,2,1)
99 pzmap(sysa,'blue')
100 subplot(2,2,2)
101 impulse(sysa,'blue')
102 [pa, za] = pzmap(sysa)

```

```
103
104 figure
105 subplot(2,2,1)
106 pzmap(sysb,'red')
107 subplot(2,2,2)
108 impulse(sysb,'red')
109 [pb, zb] = pzmap(sysb)
110
111 figure
112 subplot(2,2,1)
113 pzmap(sysp,'black')
114 subplot(2,2,2)
115 impulse(sysp,'black')
116 [pp, zp] = pzmap(sysp)
```



## D.2 MODELAGEM MATEMÁTICA PARA ELASTÔMEROS NATURAIS

```

1 %% -----
2 % Descrição: Programa de modelagem BG massa–mola–amortecedor
3 % Autor: Ludmila Evangelista dos Santos
4 % Data: 24 de maio de 2017
5 %% ----- Limpeza de Dados -----
6 close all
7 clear all
8 clc
9 %% ----- Leitura dos dados Experimentais -----
10 Ma = xlsread('dadosl.xls','Plan1','G1:G200'); % Deflexão (mm) – 80žC – 0%
11 Mb = xlsread('dadosl.xls','Plan1','J1:J200'); % Deflexão (mm) – 80žC – 20%
12 Mp = xlsread('dadosl.xls','Plan1','M1:M200'); % Deflexão (mm) – 80žC – 40%
13
14 Na = xlsread('dadosl.xls','Plan1','H1:H200'); % Força (N) – 80žC – 0%
15 Nb = xlsread('dadosl.xls','Plan1','K1:K200'); % Força (N) – 80žC – 20%
16 Np = xlsread('dadosl.xls','Plan1','N1:N200'); % Força (N) – 80žC – 40%
17
18 La = xlsread('dadosl.xls','Plan1','G200'); % Desloc–máx (mm) – 80žC – 0%
19 Lb = xlsread('dadosl.xls','Plan1','J200'); % Desloc–máx (mm) – 80žC – 20%
20 Lp = xlsread('dadosl.xls','Plan1','M200'); % Desloc–máx (mm) – 80žC – 40%
21
22 Fa = xlsread('dadosl.xls','Plan1','H200'); % Força máxima 80žC – 0%
23 Fb = xlsread('dadosl.xls','Plan1','K200'); % Força máxima 80žC – 20%
24 Fp = xlsread('dadosl.xls','Plan1','N200'); % Força máxima 80žC – 40%
25 %% ----- Variáveis -----
26 ma=(6.49/1000); % massa do látex 80žC – 0% [kg]
27 ka=Fa/(La/1000); % Amortecimento elastico [N/m]
28 ba=ka*1e-5; % Coeficiente de amortecimento [N.s/m]
29
30 mb=(6.57/1000); % massa do látex 80žC – 20% [kg]
31 kb=Fb/(Lb/1000); % Amortecimento elastico [N/m]
32 bb=kb*1e-5; % Coeficiente de amortecimento [N.s/m]
33
34 mp=(6.41/1000); % massa do látex 80žC – 40% [kg]
35 kp=Fp/(Lp/1000); % Amortecimento elastico [N/m]
36 bp=kp*1e-5; % Coeficiente de amortecimento [N.s/m]
37
38 Q=linspace(0,0.0065,200); % 137 é o números de linhas do arquivo excel
39 %% ----- Solução x'=Ax+Bu Y=Cx+Du -----
40 Aa = [0 1/ma;-ka -ba/ma]; % BG 80žC – 0%
41 Ab = [0 1/mb;-kb -bb/mb]; % BG 80žC – 20%
42 Ap = [0 1/mp;-kp -bp/mp]; % BG 80žC – 40%
43 B = [0; 1]; % BG
44 C = [1 0]; % BG (Interesse no vetor x1)
45 D = 0;
46
47 sysa = ss(Aa,B,C,D); % Espaços de estados BG 80žC – 0%
48 sysb = ss(Ab,B,C,D); % Espaços de estados BG 80žC – 20%
49 sysp = ss(Ap,B,C,D); % Espaços de estados BG 80žC – 40%
50
51 ua=ka*Q; % Função pra k linear (80žC – 0%)

```

```

52 ub=kb*Q; % Função pra k linear (80žC – 20%)
53 up=kp*Q; % Função pra k linear (80žC – 40%)
54
55 [Xa,Ua,Wa] = lsim(sysa,ua,Q); % Solução Elatômero 80žC – 0%
56 [Xb,Ub,Wb] = lsim(sysb,ub,Q); % Solução Elatômero 80žC – 20%
57 [Xp,Up,Wp] = lsim(sysp,up,Q); % Solução Elatômero 80žC – 40%
58
59 Ea =(Xa./13).*100; %Tranforma o deslocamento Xa em deformação
60 Eb =(Xb./13).*100; %Tranforma o deslocamento Xb em deformação
61 Ep =(Xp./13).*100; %Tranforma o deslocamento Xp em deformação
62
63 Lma =(Ma./13).*100; %Tranforma o deslocamento Ma em deformação
64 Lmb =(Mb./13).*100; %Tranforma o deslocamento Mb em deformação
65 Lmp =(Mp./13).*100; %Tranforma o deslocamento Mp em deformação
66 %%----- Análise de Estabilidade -----
67 figure
68 subplot(2,2,1)
69 pzmap(sysa,'blue')
70 subplot(2,2,2)
71 impulse(sysa,'blue')
72 [pa, za] = pzmap(sysa)
73
74 figure
75 subplot(2,2,1)
76 pzmap(sysb,'red')
77 subplot(2,2,2)
78 impulse(sysb,'red')
79 [pb, zb] = pzmap(sysb)
80
81 figure
82 subplot(2,2,1)
83 pzmap(sysp,'black')
84 subplot(2,2,2)
85 impulse(sysp,'black')
86 [pp, zp] = pzmap(sysp)
87 %%----- Visualização de Dados -----
88 figure
89 plot(Ea*1000,Na,'blue-.',Lma,Na,'blue-',...
90 Eb*1000,Nb,'r-.',Lmb,Nb,'r-',...
91 Ep*1000,Np,'black-.',Lmp,Np,'black-') % Valores equivalentes à mm
92 axis([0,50,0,1100]) % Limites dos eixos
93 xlabel('Deformação (%)'); % Rótulo do eixo "X"
94 ylabel('Força (N)'); % Rótulo do eixo "Y"
95 legend('BG 80žC – 0% H_2O','Exp. 80žC – 0% H_2O',...
96 'BG 80žC – 20% H_2O','Exp. 80žC – 20% H_2O',...
97 'BG 80žC – 40% H_2O','Exp. 80žC – 40% H_2O',...
98 'Location','northwest');
99 grid
100
101 figure
102 plot(Lma,Lma,'blue-',...

```

```

103 Ea*1000,Lma,'blue-.',...
104 Eb*1000,Lmb,'r-.',...
105 Ep*1000,Lmp,'black-.' ) % Valores equivalentes à mm
106 axis([0,50,0,50]) % Limites dos eixos
107 xlabel('Deformação (%)'); % Rótulo do eixo "X"
108 ylabel('Deformação (%)'); % Rótulo do eixo "Y"
109 legend('Experimental','BG 80žC - 0% H_2O',...
110 'BG 80žC - 20% H_2O','BG 80žC - 40% H_2O',...
111 'Location','northwest');
112 grid

```